

اثر سطوح مختلف روی خاک در رشد و انباشتگی این فلز در خردل ائیوپی (*Brassica carinata*) و خردل هندی (*Brassica juncea*) با تأکید بر گیاه‌پالایی

زهرا سلیمان‌نژاد^۱، *احمد عبدالزاده^۲ و حمیدرضا صادقی‌پور^۳

^۱دانشجوی دکتری گروه زیست‌شناسی، دانشگاه گلستان، استاد گروه زیست‌شناسی، دانشگاه گلستان،

^۲دانشیار گروه زیست‌شناسی، دانشگاه گلستان

تاریخ دریافت: ۹۶/۴/۳۱؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۹/۷

چکیده

سابقه و هدف: همگام با رشد روزافزون صنعت و فناوری، ورود آلاینده‌های زیست‌محیطی و در صدر آن‌ها فلزات سنگین به خاک، موجب نگرانی جامعه جهانی پیرامون خطرات احتمالی آلودگی منابع خاک در جهان شده است. روی یکی از فلزات سنگین ضروری در همه گیاهان عالی است که در بسیاری از اعمال زیستی نقش دارد، ولی در غلظت‌های بالا می‌تواند علاوه بر اثرات منفی در رشد و نمو گیاهان، سبب به خطر انداختن سلامت انسان و بقیه موجودات زنده مصرف‌کننده گردد. این پژوهش میزان تحمل، انباشتگی و توان گیاه‌پالایی دو گونه خردل ائیوپی (*Brassica carinata*) و خردل هندی (*Brassica juncea*) رشدیافته در خاک آلوده شده به غلظت‌های مختلف روی را مورد مطالعه قرار داد.

مواد و روش‌ها: گیاهان در خاک‌های آلوده شده با غلظت‌های ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم روی در گلخانه رشد یافتند. آزمایش در طرح کاملاً تصادفی و به‌صورت فاکتوریل انجام شد. فاکتور اول سطوح روی و فاکتور دوم گونه‌های گیاهی بود. گیاهان پس از ۷ هفته کشت در آغاز فاز زایش، جهت سنجش برخی خصوصیات رشدی، غلظت روی و مقدار رنگیزه‌های فتوسنتزی برداشت شدند.

یافته‌ها: نتایج مطالعه نشان داد که به‌جزء کاهش طول ریشه تحت تیمار ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم روی در خردل ائیوپی، تیمارهای روی بر بقیه صفات رشد هر دو گیاه اثر معنی‌داری نداشتند. هر دو گیاه شاخص تحمل تنش بالایی را نسبت به روی نشان دادند. با افزایش آلودگی روی در خاک، غلظت این فلز در ریشه و بخش هوایی هر دو گیاه به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. بیش‌ترین میزان تغلیظ زیستی ریشه و بخش هوایی و فاکتور انتقال در تیمار ۵۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم روی در هر دو گیاه مشاهده شد. در خردل ائیوپی تیمار ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم روی منجر به کاهش کلروفیل a و نسبت کلروفیل کل به کاروتنوئید گردید، ولی تیمارهای روی اثر معنی‌داری در میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی گیاه خردل هندی نداشت.

نتیجه‌گیری: در سطوح مختلف آلودگی روی، هر دو گونه قادر به تحمل و تجمع روی بودند، به‌طوری‌که در هر دو گونه با افزایش میزان آلودگی روی در خاک شاخص تحمل تنش افزایش یافت. بیش‌ترین میزان تغلیظ زیستی و فاکتور انتقال هر دو گیاه تحت تیمار ۵۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم روی اتفاق افتاد. تحت تیمار ۱۰۰۰ میلی‌گرم در

* مسئول مکاتبه: ah_ab99@yahoo.com

کیلوگرم روی، خردل هندی توانست در بخش هوایی حدود ۰/۰۵ درصد روی انباشته نماید که ۱/۵ برابر بیش تر از خردل اتیوپی بود. بنابراین، گیاه خردل هندی نسبت به خردل اتیوپی دارای عملکرد بهتری جهت استفاده در فرایند گیاه‌پالایی روی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آلودگی خاک، روی، شب‌بو، تحمل، گیاه‌پالایی

مقدمه

آلودگی خاک به فلزات سنگین یکی از مهم‌ترین مشکلات زیست‌محیطی در بسیاری از نقاط جهان می‌باشد. آلودگی محیط به این فلزات معمولاً نتیجه فعالیت‌های صنعتی مانند استخراج معادن، تصفیه فلزات، بخارات آگزوها، تولیدات انرژی و سوخت، کاربرد کودها و سموم و بازیافت زباله‌های شهری می‌باشد (۲۲). آهن، مس، آلومینیوم، روی و سرب پنج مورد از صنعتی‌ترین عناصر سنگین تولیدشده، می‌باشند (۳۳).

روی به‌عنوان محافظ فولاد در صنعت آبکاری، به‌صورت فلز آلیاژکننده با مس جهت تولید برنج، در ریخته‌گری‌ها و همچنین به‌صورت ترکیبات شیمیایی در لاستیک و رنگ‌ها به‌کار می‌رود (۹). از عوارض نامطلوب زیادی روی در انسان تحریک دستگاه گوارش و استفراغ، کم‌خونی، تب، اختلالات سیستم عصبی و کاهش چربی مفید خون می‌باشد (۲۳).

میانگین مقدار روی در پوسته زمین و خاک سطحی جهان حدود ۷۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم تخمین زده شده است (۱۹). غلظت روی در خاک بین ۱۰ تا ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و حد بحرانی سمیت آن ۱۲۵ تا ۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک است (۲۱). به‌طور متوسط مقدار روی در خاک چند کشور اروپایی بین ۷-۸۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش شده است (۲۰). بررسی میزان روی در مناطق صنعتی و محل دفن زباله در ایران بیانگر آن است که مقدار روی در این مناطق در مقایسه با مقدار زمینه و حد مجاز روی در خاک‌های زراعی براساس استاندارد سازمان بهداشت جهانی

(WHO)^۱ بیش‌تر بوده است (۷). با توجه به این‌که از زمین‌های مجاور مناطق صنعتی یا محل دفن زباله به‌خصوص در مناطق شمالی کشور برای کشاورزی استفاده می‌گردد، بنابراین افزایش غلظت روی در این مناطق آلوده می‌تواند غلظت روی را در خاک‌های زراعی مجاور تحت‌تأثیر قرار دهد.

روی یکی از فلزات سنگین ضروری است که در بسیاری از اعمال زیستی نقش دارد. به‌عنوان مثال روی باعث ثبات غشای پلاسمایی سلول‌ها شده، در ساختار متالوآنزیم‌ها وجود دارد و کوفاکتور بسیاری از آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان می‌باشد (۳۸). روی در غلظت‌های زیاد سمی است و سبب مهار رشد گیاه می‌گردد (۳۷). حد سمیت روی بستگی به گونه گیاهی، ژنوتیپ و همچنین مرحله رشد گیاه دارد. رشد گونه‌های گیاهی حساس، زمانی‌که بافت‌های آن‌ها حاوی ۲۰۰-۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم روی باشد، به تأخیر می‌افتد (۲۵). با این‌حال، محدوده میزان سمی روی در گیاهان مختلف، اغلب بالاتر (mg kg^{-1}) ۵۰۰-۱۰۰ می‌باشد (۲۷). آلودگی گیاهان با عناصری مانند روی باعث نابودی گیاهان حساس و باقی ماندن گیاهان مقاوم و در نتیجه رویش گونه‌های خاص گیاهی در مناطق آلوده می‌شود (۳۵).

برای پاکسازی محل‌های آلوده ممکن است از حفاری خاک، آبشویی، جداسازی مکانیکی و یا تیمارهای شیمیایی استفاده شود که بسیار دشوار و پرهزینه هستند، اما امروزه استفاده از گیاهان به‌علت

1- World Health Organization

دو گونه خردل هندی و اتیویی در جهت پاکسازی محیط بررسی شده است. بنابراین در این پژوهش این دو گونه در خاک آلوده شده به غلظت‌های مختلف روی کشت شده و رشد، انباشتگی روی، دامنه تحمل گیاه نسبت به فلز و فاکتور انتقال فلز از ریشه به بخش هوایی مورد بررسی قرار گرفت، تا توان گیاه‌پالایی خاک توسط این دو گونه ارزیابی گردد.

مواد و روش‌ها

شرایط کاشت: بذر دو گونه خردل هندی و خردل اتیویی از مرکز پژوهش‌های دانه‌های روغنی استان مازندران تهیه شد. بذرها ضدعفونی شده پس از سه روز جوانه‌زنی در پتری‌دیش، در اوایل فروردین ماه سال ۱۳۹۴ به گلدان‌های پلاستیکی سه کیلوگرمی پر شده از خاک (۳ عدد در هر گلدان) منتقل و در گلخانه‌ای با پوشش سقف و دیواره پلاستیکی برای جلوگیری از نفوذ باران و با دو طرف فضای آزاد جهت جریان هوای کافی، کشت شدند. جهت آماده‌سازی خاک، ابتدا به‌میزان ۱۰۰ کیلوگرم خاک زراعی و غیرآلوده اطراف شهرستان نکا جمع‌آوری گردید. برای ایجاد آلودگی روی در خاک به‌طور مصنوعی از غلظت‌های ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم روی، به‌صورت نمک سولفات روی استفاده شد، که این سطوح با توجه به مطالعاتی که در گیاهان مختلف انجام شد از جمله، عمویی و همکاران (۲۰۱۲) در بررسی گیاه‌پالایی روی در گیاهان گاو پنبه، تاج‌خروس و ذرت از غلظت‌های ۲۰۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم روی استفاده نمودند (۲)، همچنین براساس محدوده سمی روی در گیاهان و این‌که گیاهان مورد مطالعه ما از خانواده متحمل شب‌بو بودند، انتخاب گردید. نمک به‌طور مجزا در آب مقطر حل و به‌صورت لایه لایه به سطح خاک اسپری شده و خاک هر گلدان جداگانه و به‌طور

هزینه کم‌تر و سازگار با محیط زیست، در امر خارج‌سازی فلزات سنگین از خاک پیشنهاد می‌شود (۳۶). گیاه‌پالایی یکی از روش‌های زیست‌پالایی خاک است که در این روش از گیاهان مقاوم جهت پالایش خاک‌های آلوده به ترکیبات آلی و معدنی استفاده می‌گردد. مزیت‌هایی که این روش نسبت به سایر روش‌ها دارد عبارتند از سادگی، ارزان بودن و امکان بهره‌گیری در سطح وسیع می‌باشد. در این روش انتخاب گیاه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. انتخاب گیاه وابسته به شرایط اقلیمی و همچنین میزان آلودگی می‌باشد (۲۶ و ۲۸). برخی از گیاهان متحمل، توانایی جذب و انباشت مقادیر زیادی از فلزات سنگین در غلظت‌های بیش‌تر از آنچه در خاک وجود دارد، می‌باشند و این گیاهان انباشت‌گر نامیده می‌شوند. بیش‌تر گیاهان انباشت‌گر متعلق به خانواده شب‌بو می‌باشند که اغلب آن‌ها توده زیستی پایین داشته و رشد آن‌ها محدود به مناطق جغرافیایی خاص است. برخی پژوهش‌گران توان گیاه‌پالایی را در دو گونه خردل هندی (*Brassica juncea*) و خردل اتیویی (*Brassica carinata*) به‌صورت جداگانه گزارش کرده‌اند. این دو گونه به‌دلیل رشد سریع، تولید توده زیستی بالا، قابلیت رشد و نمو مناسب در اکثر مناطق کشور می‌توانند برای گیاه‌پالایی مناطق آلوده استفاده شوند. خردل هندی به‌عنوان یک گیاه با تولید توده زیستی بالا و توان جذب و تجمع فلزات سنگین مانند کادمیوم، مس، نیکل، روی و سرب شناخته شده است (۱۶). کوارتاسی و همکاران (۲۰۰۷) نشان دادند که خردل اتیویی در بین نه‌گونه مورد بررسی، بالاترین مقدار فلزات را بدون کاهش معنی‌دار توده زیستی در بخش هوایی انباشته نمود (۳۱).

با توجه به آلودگی فلزات سنگین به‌ویژه روی در برخی مناطق کشور از جمله مناطق دفن و انباشت زباله و اطراف کارخانه‌ها، در این پژوهش امکان استفاده از

(۲۰۱۱) و اکبرپور و همکاران (۲۰۱۲) انتخاب گردید (۱۷، ۲۹ و ۱). در طول دوره آزمایش اغلب روزها هوا آفتابی بوده و میانگین حداکثر و حداقل دمای روز و شب در گلخانه به ترتیب ۲۹ و ۱۸ درجه سانتی‌گراد و میانگین رطوبت نسبی ۸۱٪ بود. آبیاری گلدان‌ها در طول دوره رشد، با آب شهری انجام شده و گیاهان پس از ۷ هفته (در آغاز فاز زایش) جهت سنجش برخی خصوصیات رشدی برداشت شدند.

یکنواخت مخلوط شد. خاک مورد مطالعه رسی با pH حدود ۷ بود و غلظت روی آن پیش از اضافه نمودن نمک سولفات روی اندازه‌گیری شد (جدول ۱). خاک‌های آلوده در حد ظرفیت زراعی آبیاری شده و جهت تثبیت و تعادل اجزای خاک و فلز روی و همسان‌سازی شرایط آلودگی مصنوعی با شرایط آلودگی طبیعی به مدت سه ماه در شرایط هوای آزاد قرار داده شد، که این مدت با توجه به مطالعات هوانگ و همکاران (۲۰۰۹)، متسرع‌زاده و ثوابی

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در این پژوهش.

Table 1. Some physical and chemical characteristics of soil used in this experiment.

روی (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Zinc (mg Kg ⁻¹)	EC (dSm ⁻¹)	pH	بافت خاک Soil texture	ماسه (%) Sand (%)	سیلت (%) Silt (%)	رس (%) Clay (%)
0.5	1.11	7	رسی Clay	14	39	47

اندازه‌گیری شاخص تحمل تنش: برای ارزیابی تحمل گونه‌ها به روی، شاخص تحمل تنش (STI)^۲ از فرمول پیشنهادی فرناندز (۱۹۹۲) (رابطه ۲) محاسبه شد (۱۱).

$$STI = \frac{DW_c \times DW_t}{(DW_c)^2} \quad (2)$$

که در آن، DW_t ، DW_c و $\overline{DW_c}$ به ترتیب نشان‌دهنده وزن خشک تحت تیمار روی، وزن خشک شاهد برای هر گونه و میانگین وزن خشک شاهد دو گونه می‌باشد. اندازه‌گیری میزان کلروفیل و کاروتنوئید: برای سنجش میزان کلروفیل و کاروتنوئید از روش آرنون (۱۹۴۹) استفاده شد (۳). ابتدا مقدار ۵۰ میلی‌گرم از بافت تر گیاه با ۳ میلی‌لیتر استون ۸۰٪ سائیده شد و سپس مخلوط به دست آمده به مدت ۱۰ دقیقه در دور ۱۳۰۰۰g سانتریفیوژ گردید و از فاز فوقانی جهت سنجش کلروفیل و کاروتنوئید استفاده شد.

اندازه‌گیری صفات رشد: پس از برداشت، ابتدا ریشه گیاهان با آب شسته شده و سپس آب سطحی ریشه‌ها با دستمال کاغذی گرفته شد. بعد از آن ریشه از بخش هوایی جدا گردید و طول و وزن آن‌ها اندازه‌گیری شد. جهت اندازه‌گیری وزن خشک، نمونه‌ها به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد در آون قرار گرفتند و مجدداً توزین شدند.

به منظور تعیین شاخص برگ ویژه، از هر گیاه سه برگ (از قسمت‌های مختلف پایین، میانه و بالا) جدا شده و پس از اندازه‌گیری وزن تر، نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در آون در درجه حرارت ۷۵ درجه سانتی‌گراد خشک و توزین شدند. جهت اندازه‌گیری سطح برگ از نرم‌افزار ImageJ استفاده شد و سپس سطح برگ ویژه (SLA)^۱ بر حسب سانتی‌متر مربع بر گرم تعیین گردید (۲) (رابطه ۱).

$$SLA = \frac{\text{Leaf area}}{\text{Leaf dry weight}} \quad (1)$$

معنی دار نبود (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که به ترتیب تیمار ۱۰۰۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم روی منجر به کاهش طول ریشه و سطح برگ ویژه برگ پایینی گیاه خردل اتیوپی در مقایسه با شاهد گردید. تیمارهای روی اثر معنی‌داری در هیچ یک از صفات رشد مورد بررسی گیاه خردل هندی در مقایسه با شاهد نداشت (جدول ۳). میزان رشد ریشه یک گیاه به‌عنوان یکی از شاخص‌های مهم مقاومت گیاه نسبت به غلظت‌های مختلف یک فلز است. از آن‌جا که ریشه به‌طور ویژه‌ای به حضور فلزات سمی حساس می‌باشد و اولین اندامی است که در معرض سمیت قرار می‌گیرد، از طول ریشه به‌عنوان یکی از مهم‌ترین معیارهای تأثیر سمیت فلزات بر گیاهان استفاده می‌شود (۵). معمولاً اولین نشانه‌های قابل مشاهده مرتبط با سمیت فلزات سنگین نه تنها توقف رشد، بلکه کاهش رشد ریشه و تغییرات در مورفولوژی ریشه گیاهان می‌باشد (۱۰). اکثر مطالعات در جنس‌های براسیکا کاهش رشد ریشه تحت فلزات سنگین مختلف را گزارش کردند (۸ و ۱۸). حال (۲۰۰۲) اشاره نمود که برای حفظ تولید زیست توده تحت شرایط تغییر زیست‌محیطی، گیاهان نیاز به سیستم سم‌زدایی سلولی کارآمد و مختلف دارند (۱۳). فعال‌سازی مکانیسم‌های دفاعی ممکن است سبب کاهش اندک زیست‌توده خشک و طول ریشه گیاه خردل اتیوپی در حضور فلزات غیردوکس مانند کادمیوم، سرب و روی گردیده باشد (۳۰). شاخص سطح برگ ویژه، در واقع نسبت سطح بافت‌های فتوسنتزکننده را به وزن آن‌ها نشان می‌دهد. بنابراین با کاهش سطح برگ ویژه، کارایی برگ از لحاظ فتوسنتزی افزایش می‌یابد، زیرا هرچه سطح برگ ویژه کم‌تر شود، ضخامت برگ بیش‌تر، غلظت کلروپلاست و همچنین کلروفیل بیش‌تر و تراکم سلول‌های فتوسنتزکننده و کارایی نور افزایش می‌یابد (۴).

سنجش غلظت روی: برای استخراج روی میزان ۱۰۰ میلی‌گرم از وزن خشک بخش هوایی و ریشه گیاهان به‌منظور حذف ترکیبات آلی به مدت ۸ ساعت در داخل کوره در دمای ۵۷۵ درجه سانتی‌گراد سوزانده شد (۱۵) و غلظت روی بعد از هضم اسیدی با استفاده از دستگاه جذب اتمی مدل GBC Avanta ver.1.33 اندازه‌گیری شد.

به‌منظور ارزیابی پتانسیل استخراج گیاهان، فاکتور تغلیظ زیستی بخش هوایی (BCFS)^۱ و ریشه (BCFR)^۲ گیاه با استفاده از رابطه ۳ محاسبه گردید، که C نشان‌دهنده غلظت روی می‌باشد (۱۹).

$$BCFR = \frac{C_{root}}{C_{soil}} \quad BCFS = \frac{C_{shoot}}{C_{soil}} \quad (3)$$

جهت ارزیابی توانایی گیاه در انتقال کادمیوم از ریشه به بخش هوایی، فاکتور انتقال روی طبق رابطه ۴ محاسبه گردید.

$$TF = \frac{C_{shoot}}{C_{root}} \quad (4)$$

تجزیه آماری: این آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی و در ۳ تکرار انجام شد (هر گلدان به‌عنوان یک تکرار می‌باشد). فاکتور اول سطوح روی و فاکتور دوم گونه‌های مورد مطالعه بود. محاسبات آماری با استفاده از نرم‌افزار SAS و مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح ۹۵٪ صورت گرفت.

نتایج و بحث

ارزیابی صفات رشد: نتایج آنالیز واریانس نشان داد که اثر روی فقط در طول ریشه و اثر گونه فقط در وزن خشک بخش هوایی معنی‌دار بود. همچنین اثر متقابل روی × گونه در هیچ‌یک از صفات رشد

- 1- Bioconcentration Factor Shoot
- 2- Bioconcentration Factor Root

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس دوطرفه اثر روی، گونه و اثر متقابل روی × گونه بر برخی صفات رشد.

Table 2. Results of two-way analysis of variance of Zn and species effects and their interaction (Zn×Species) for the some growth characteristics.

منابع تغییرات Sources of change	درجه آزادی Degrees of freedom	طول ریشه Root length	طول بخش هوایی Shoot length	وزن خشک ریشه Root dry weight	وزن خشک بخش هوایی Shoot dry weight	مسطح برگ ویژه برگ پایینی Lower leaf specific leaf area	مسطح برگ ویژه برگ میانی Middle leaf specific leaf area	مسطح برگ ویژه برگ بالایی Upper leaf specific leaf area
روی zinc	2	44.72*	17.67 ^{ns}	0.01 ^{ns}	0.03 ^{ns}	3251.70 ^{ns}	2801.91 ^{ns}	12241.27 ^{ns}
گونه species	1	0.02 ^{ns}	60.42 ^{ns}	0.10 ^{ns}	0.23**	2968.35 ^{ns}	24.05 ^{ns}	25.75 ^{ns}
روی × گونه zinc × species	2	7.77 ^{ns}	14.12 ^{ns}	0.01 ^{ns}	0.02 ^{ns}	658.34 ^{ns}	744.47 ^{ns}	177.41 ^{ns}
خطا Error	12	10.43	14.16	0.02	0.02	914.39	1774.24	4276.74
کل Total	17							

جدول ۳- مقایسه میانگین برخی صفات رشد در دو گیاه خردل آبیوی و خردل هندی رشد یافته در خاک آلوده شده با سطوح مختلف روی.

Table 3. Mean comparison of some growth characteristics on *B. carinata* and *B. juncea* grown in soils contaminated with different zinc levels.

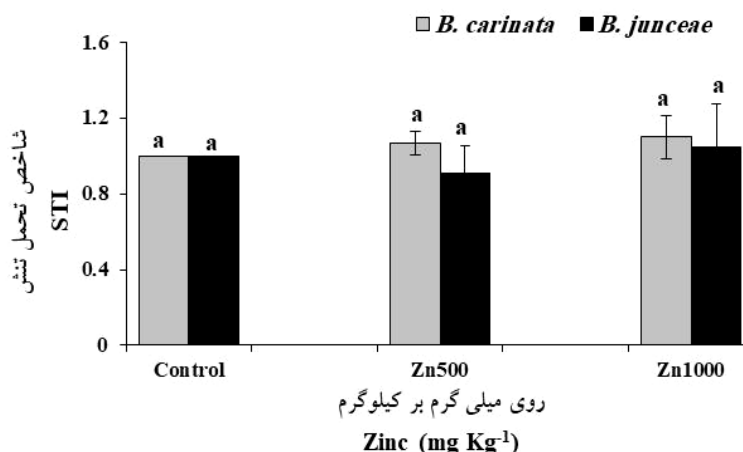
<i>B. juncea</i>		<i>B. carinata</i>		صفات رشد growth characteristic
Zinc concentration in soil (mg kg ⁻¹)	500	1000	500	
1000	32.33 ± 1.83 ^{ab}	32.78 ± 1.05 ^{ab}	31.00 ± 0.88 ^{ab}	طول ریشه (سانتی متر) Root length (cm)
	27.22 ± 2.78 ^{ab}	26.11 ± 1.84 ^b	33.77 ± 0.98 ^a	طول بخش هوایی (سانتی متر) Shoot length (cm)
	0.97 ± 0.12 ^a	0.93 ± 0.11 ^a	0.73 ± 0.05 ^a	وزن خشک ریشه (گرم هر گیاه) Root dry weight (g Plant ⁻¹)
	1.21 ± 0.14 ^{ab}	0.96 ± 0.10 ^b	1.29 ± 0.03 ^a	وزن خشک بخش هوایی (گرم هر گیاه) Shoot dry weight (g Plant ⁻¹)
	139.28 ± 28.03 ^b	152.46 ± 21.40 ^{ab}	138.81 ± 7.38 ^b	سطح برگ ویژه برگ پایینی (سانتی مترمربع بر گرم) Lower leaf specific leaf area (cm ² g ⁻¹)
	156.97 ± 27.29 ^a	153.58 ± 39.90 ^a	119.84 ± 5.53 ^a	سطح برگ ویژه برگ میانی (سانتی مترمربع بر گرم) Middle leaf specific leaf area (cm ² g ⁻¹)
	169.81 ± 35.53 ^a	214.92 ± 41.79 ^a	125.00 ± 41.93 ^a	سطح برگ ویژه برگ بالایی (سانتی مترمربع بر گرم) Upper leaf specific leaf area (cm ² g ⁻¹)

میانگین ± خطای استاندارد با ۳ تکرار، میانگین های هر ردیف که حداقل دارای یک حرف مشترک باشند در سطح ۹۵٪ با آزمون دانکن اختلاف معنی داری ندارند.

Means followed by the same letter within each row are not significantly different according to a Duncan's multiple comparison test (P < 0.05). Means ± standard error (n=3).

ژنوتیپ‌ها در شرایط محیطی مختلف و تعیین تحمل و حساسیت آن‌ها، شاخص تحمل تنش (STI) را معرفی نمود (۱۱). ژنوتیپ‌های پایدارتر براساس این شاخص دارای مقادیر بالاتر STI هستند.

ارزیابی بردباری گیاهان به تنش روی: در مقایسه ارزیابی تحمل، هر دو گیاه خردل اتیوپی و خردل هندی STI زیادی را نسبت به روی نشان دادند (شکل ۱). فرناندز (۱۹۹۲) برای ارزیابی واکنش



شکل ۱- اثر غلظت‌های مختلف روی در شاخص تحمل تنش دو گونه *B. carinata* و *B. juncea*. میله‌ها نشان‌دهنده خطای استاندارد می‌باشد، میانگین‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک باشند در سطح ۹۵٪ با آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری ندارند.

Figure 1. Effect of different zinc (mg kg⁻¹) concentration on stress tolerance index and tolerance index in *B. carinata* and *B. juncea*. Error bars represent the standard error. Different small letters on histograms represent statistically significant differences according to a Duncan's multiple comparison test at P < 0.05.

بخش هوایی انباشته نماید. در مقایسه بین دو گیاه مورد مطالعه در آلودگی بالای روی، میزان انباشت روی در ریشه و بخش هوایی گیاه خردل هندی به ترتیب ۱/۸ و ۱/۵ برابر بیش‌تر از گیاه خردل اتیوپی بوده است.

بیش‌ترین تغلیظ زیستی و فاکتور انتقال در بخش هوایی گیاه خردل هندی تحت تیمار ۵۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم روی اتفاق افتاد. به‌طور مشابه در هر دو گیاه خردل اتیوپی و خردل هندی، بیش‌ترین تغلیظ زیستی ریشه و بخش هوایی و همچنین فاکتور انتقال در تیمار ۵۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم روی مشاهده گردید، ولی فاکتور انتقال گیاه خردل هندی تحت

میزان انباشت روی در گیاهان: نتایج آنالیز واریانس نشان داد که اثر روی بر تمامی پارامترهای مرتبط با غلظت و اثر گونه بر غلظت روی و فاکتور تغلیظ زیستی ریشه و بخش هوایی معنی‌دار بود. همچنین اثر متقابل روی × گونه بر تمامی پارامترهای مرتبط با غلظت، به‌جز فاکتور تغلیظ زیستی ریشه معنی‌دار بود (جدول ۴). با افزایش غلظت آلودگی روی در خاک، غلظت روی در ریشه و بخش هوایی هر دو گیاه خردل اتیوپی و خردل هندی به‌طور معنی‌داری افزایش یافت، به‌طوری‌که گیاه خردل هندی تحت تیمار ۱۰۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم روی توانسته است به‌ترتیب حدود ۰/۰۸ و ۰/۰۵ درصد روی در ریشه و

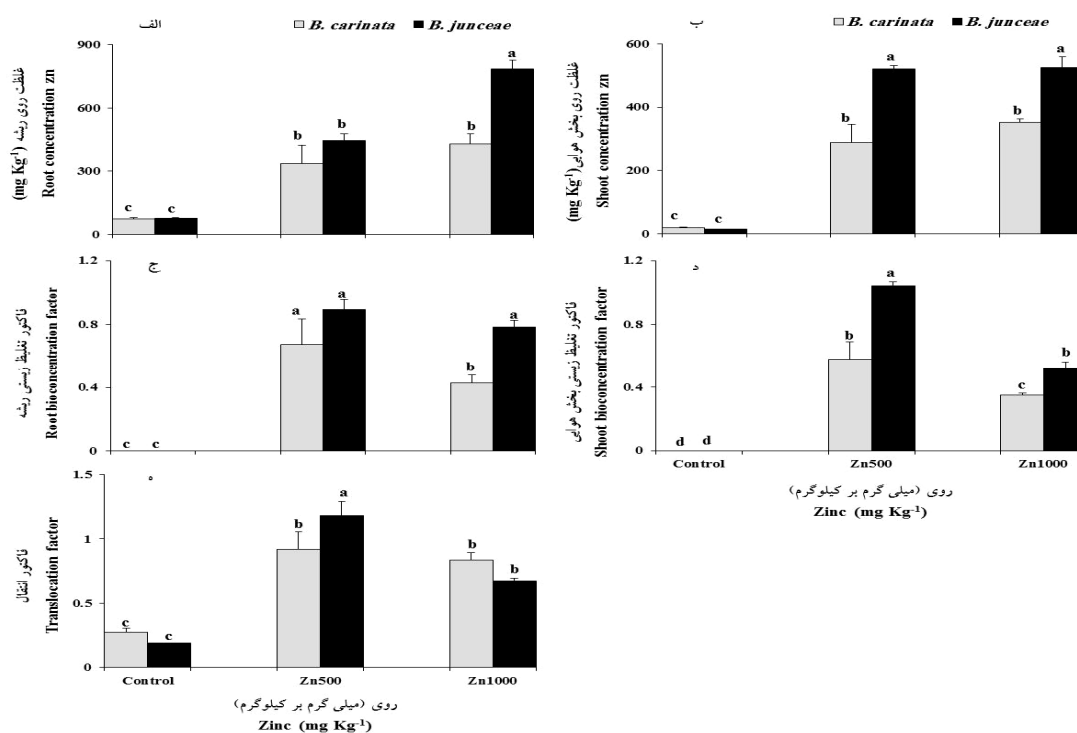
در آن‌ها در نظر گرفت. بینی و همکاران (۱۹۹۵) اشاره نمودند که گونه یا بخش گیاهی که دارای BCF بین ۱-۱۰، ۱-۱، ۰/۱-۱، ۰/۱-۰/۱ و کم‌تر از ۰/۱ باشد به ترتیب بیش‌انباشت‌گر، متوسط انباشت‌گر، کم‌انباشت‌گر و بدون انباشت‌گر می‌باشد (۶). ریموند و هریسون (۲۰۱۷)، همدوچ و همکاران (۲۰۱۲) و رشید شمالی و همکاران (۲۰۱۲) نیز براساس این تقسیم‌بندی گروه انباشت‌گر گیاهان مورد مطالعه را مشخص نمودند (۳۴، ۱۴ و ۳۲). با توجه به تقسیم‌بندی بینی و همکاران (۱۹۹۵)، می‌توان گیاه خردل اتیوپی را به‌عنوان گیاه متوسط انباشت‌گر و خردل هندی را به‌عنوان گیاه بیش-انباشت‌گر روی در نظر گرفت.

این تیمار حدوداً ۲۳٪ بیش‌تر از خردل اتیوپی بوده است (شکل ۲). تحت تیمار ۵۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم روی در خردل هندی، تجمع روی در بخش هوایی گیاه بیش‌تر از ریشه بود. فری و همکاران (۲۰۰۰) نیز نشان دادند که در گیاه بیش‌انباشت‌گر *Thlaspi caerulescens*، غلظت روی اندازه‌گیری شده در بخش هوایی بیش‌تر از ریشه بود (۱۲). به‌نظر می‌رسد تعیین غلظت فلز در گیاه یا اندام، می‌تواند برآورد بهتری از بازده استخراج فلزات سنگین در یک گونه داده و نشان‌دهنده وسعت فلزاتی باشد که می‌تواند توسط یک گیاه حذف شود. بنابراین براساس آنالیز فاکتور تغلیظ زیستی، با توجه به قابلیت گیاهان برای جذب فلزات سنگین و حساسیت به آلودگی بالای فلز می‌توان چهار گروه

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس دوطرفه اثر روی، گونه و اثر متقابل روی × گونه بر غلظت روی، فاکتور تغلیظ زیستی و فاکتور انتقال.

Table 4. Results of two-way analysis of variance of Zn and species effects and their interaction (Zn×Species) for zinc concentration, bioconcentration factor and translocation factor.

فاکتور انتقال Translocation factor	فاکتور تغلیظ زیستی بخش هوایی Shoot bioconcentration factor	فاکتور تغلیظ زیستی ریشه Root bioconcentration factor	غلظت روی بخش هوایی Shoot Zn concentration	غلظت روی ریشه Root Zn concentration	درجه آزادی Degrees of freedom	منابع تغییرات Sources of change
1.02**	0.98**	1.01**	328374.80**	426105.78**	2	روی Zinc
0.00 ^{ns}	0.20**	0.16**	79748.19**	108651.01**	1	گونه Species
0.08*	0.08**	0.05 ^{ns}	22820.14**	48603.72**	2	روی × گونه zinc×species
0.02	0.01	0.02	2311.69	6203.44	12	خطا Error
					17	کل Total



شکل ۲- اثر غلظت‌های مختلف روی خاک در غلظت روی ریشه (الف)، بخش هوایی (ب)، فاکتور تغلیظ زیستی ریشه (ج) و بخش هوایی (د) و فاکتور انتقال (ه) دو گیاه *B. juncea* و *B. carinata*. میله‌ها نشان‌دهنده خطای استاندارد می‌باشد، در هر نمودار، میانگین‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک باشند در سطح ۹۵٪ با آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری ندارند.

Figure 2. Effect of different soil zinc concentration (mg kg⁻¹) on Zn concentration and bioconcentration factor, in root and shoot and translocation factor in *B. carinata* and *B. juncea*. Error bars represent the standard error. Different small letters on histograms represent statistically significant differences according to a Duncan's multiple comparison test at P < 0.05.

و خردل هندی به‌ترتیب در گیاه شاهد و تیمار ۱۰۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم روی مشاهده شد (جدول ۶). کاهش میزان کلروفیل در خردل اتیوپی ممکن است به‌وسیله مهار آنزیم‌های گاما- آمینو لوالونیک اسید دهیدروژناز و پروتوکلروفیل ردوکتاز باشد که سبب مهار مراحل مختلف بیوسنتز کلروفیل تحت تنش فلزات سنگین می‌شوند (۲۴). کاروتنوئیدها کم‌تر تحت‌تأثیر فلزات سنگین قرار می‌گیرند و در نتیجه، موجب کم‌تر شدن نسبت کلروفیل به کاروتنوئید در گیاهان می‌شوند. علاوه بر مهار بیوسنتز کلروفیل‌ها به‌وسیله فلزات سنگین می‌توان به تجزیه زیستی کلروفیل در حضور فلزات سنگین نیز اشاره نمود

اثر روی در میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی: نتایج آنالیز واریانس نشان داد که اثر روی در هیچ‌یک از رنگیزه‌های فتوسنتزی معنی‌دار نبود، ولی اثر گونه در کاروتنوئید و نسبت کلروفیل کل به کاروتنوئید و اثر متقابل روی × گونه نیز در نسبت کلروفیل کل به کاروتنوئید معنی‌دار بود (جدول ۵). تیمار ۱۰۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم روی منجر به کاهش معنی‌دار میزان کلروفیل a و نسبت کلروفیل کل به کاروتنوئید در خردل اتیوپی گردید، ولی سطوح مختلف آلودگی روی اثر معنی‌داری بر میزان و نسبت رنگیزه‌های فتوسنتزی گیاه خردل هندی در مقایسه با شاهد نداشت. بیش‌ترین میزان کلروفیل کل در خردل اتیوپی

(۳۱). عدم کاهش میزان کلروفیل در خردل هندی را می‌توان به مکانیسم‌های دفاعی مختلفی که توسط گیاه در مقابل تنش فلزات به کار گرفته می‌شود، نسبت داد. جان و همکاران (۲۰۰۹) نشان دادند که غلظت‌های صفر، ۱۵۰ و ۳۰۰ میکرومولار کادمیوم، طی مدت ۴۰ روز تیماردهی، میزان کلروفیل a، کلروفیل b و کل و نیز میزان کاروتنوئیدها را در خردل هندی در مرحله گلدهی افزایش داد، اما با تداوم شرایط تنش و گذشت زمان، میزان این رنگیزه‌ها کاهش یافت (۱۸).

جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس اثر روی، گونه و اثر متقابل روی × گونه بر رنگیزه‌های فتوسنتزی.

Table 5. Results of two-way analysis of variance of Zn and species effects and their interaction (Zn×Species) on photosynthetic pigments.

نسبت کلروفیل کل به کاروتنوئید Ratio Total chlorophyll/ carotenoids	کاروتنوئید Carotenoids (mg g ⁻¹ FW)	کلروفیل کل Total chlorophyll (mg g ⁻¹ FW)	کلروفیل b Chlorophyll b (mg g ⁻¹ FW)	کلروفیل a Chlorophyll a (mg g ⁻¹ FW)	درجه آزادی Degrees of freedom	منابع تغییرات Sources of change
0.00 ^{ns}	0.07 ^{ns}	0.01 ^{ns}	0.00 ^{ns}	0.00 ^{ns}	2	روی Zinc
0.01 ^{**}	3.48 ^{**}	0.01 ^{ns}	0.00 ^{ns}	0.00 ^{ns}	1	گونه Species
0.00 [*]	0.33 ^{ns}	0.02 ^{ns}	0.00 ^{ns}	0.01 ^{ns}	2	روی × گونه zinc×species
0.00	0.36	0.01	0.00	0.00	12	خطا Error
					17	کل Total

جدول ۶- مقایسه میانگین رنگیزه‌های فتوسنتزی دو گیاه خردل اتیوپی و خردل هندی رشد یافته در سطوح مختلف روی.

Table 6. Mean comparison of photosynthetic pigments in *B. carinata* and *B. juncea* grown under different zinc levels.

نسبت کلروفیل کل به کاروتنوئید Ratio Total chlorophyll/ carotenoids	کاروتنوئید Carotenoids	کلروفیل کل Total chlorophyll	کلروفیل b Chlorophyll b	کلروفیل a Chlorophyll a	غلظت روی در خاک Concentration Zn in soil (mg kg ⁻¹)	گیاه Plant
0.16±0.01 ^{ab}	2.95±0.20 ^{ab}	0.48±0.02 ^a	0.15±0.01 ^a	0.33±0.01 ^a	0.5	خردل اتیوپی <i>B. carinata</i>
0.13±0.02 ^{bc}	3.38±0.35 ^a	0.45±0.08 ^a	0.15±0.04 ^a	0.30±0.04 ^{ab}	500	
0.11±0.00 ^c	2.82±0.56 ^{ab}	0.32±0.06 ^a	0.11±0.02 ^a	0.20±0.04 ^b	1000	
0.15±0.02 ^{ab}	2.39±0.20 ^{ab}	0.37±0.02 ^a	0.12±0.00 ^a	0.24±0.01 ^{ab}	0.5	خردل هندی <i>B. juncea</i>
0.17±0.01 ^a	1.96±0.20 ^b	0.34±0.05 ^a	0.10±0.01 ^a	0.24±0.04 ^{ab}	500	
0.18±0.01 ^a	2.16±0.39 ^b	0.39±0.04 ^a	0.10±0.02 ^a	0.28±0.03 ^{ab}	1000	

میانگین ± خطای استاندارد با ۳ تکرار، میانگین‌های هر ستون که حداقل دارای یک حرف مشترک باشند در سطح ۹۵٪ با آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری ندارند.

Means followed by the same letter within each row are not significantly different according to a Duncan's multiple comparison test ($P < 0.05$). Means ± standard error (n=3).

نتیجه گیری کلی

میلی گرم بر کیلوگرم روی توانست در ریشه و بخش هوایی به ترتیب حدود ۰/۰۸ و ۰/۰۵ درصد روی انباشته نماید که به ترتیب در ریشه و بخش هوایی ۱/۸ و ۱/۵ برابر بیش تر از گیاه خردل اتیوپی بود. بنابراین گیاه خردل هندی فاکتور تغلیظ زیستی و فاکتور انتقال روی بیش تری نسبت به خردل اتیوپی دارد و توان گیاه پالایی آن بیش تر است.

نتایج این پژوهش نشان داد که میزان تولید بیوماس گیاهان رشد یافته در خاک آلوده شده با روی در هر دو گونه خردل هندی و اتیوپی در مقایسه با گیاه شاهد تفاوت معنی داری نداشت و هر دو گونه قادر به رشد در محیط آلوده به روی بودند. بیش ترین میزان تغلیظ زیستی و فاکتور انتقال هر دو گیاه تحت تیمار ۵۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم روی اتفاق افتاد. بنابراین به نظر می رسد در آلودگی متوسط روی استفاده از هر دو گیاه جهت گیاه پالایی مناسب باشد. مقایسه دو گیاه خردل اتیوپی و خردل هندی نشان می دهد که گیاه خردل هندی تحت تیمار ۱۰۰۰

سیاسگزار

این پژوهش با کمک مالی شماره ۹۵۰۶۰۴ ستاد توسعه زیست فناوری و ۹۵۸۵۰۰۶۰ صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور انجام شده است.

منابع

1. Akbarpour Saraskanroud, F., Sadri, F., and Gotalizadeh, D. 2012. Phytoremediation of heavy metal (Lead, Zinc and Cadmium) from polluted soils by Arasbaran protected area native plants. J. Soil Water Cons. 1: 53-67. (In Persian)
2. Amouei, A.I., Mahvi, A.H., Naddafi, K., Fahimi, H., Mesdaghinia, A., and Naseri, S. 2012. Investigation of optimal operating conditions in phytoremediation of soil contaminated with lead and cadmium by native plants of Iran. Sci. J. Kurdistan Univ. Med. Sci. 17: 93-102. (In Persian)
3. Arnon, D.I. 1949. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in Beta Vulgaris. Plant Physiol. 24: 1-15.
4. Bagheri, A.R., and Mohammadalipur, Z. 2011. Effects of salicylic acid on soybean yield components and growth under the salt stress conditions. J. Plant Ecophysiol. Pp: 29-41. (In Persian)
5. Baker, A.J.M., and Proctor, J. 1990. The influence of cadmium, copper, lead and zinc on the distribution and evolution of metallophyte in the British Isles. Plant Syst. Evol. 173: 91-108.
6. Bini, C., Gentili, L., Maleci, B., and Vaselli, O. 1995. Trace elements in plants and soil of urban parks. Annexed to contaminated soil prost, INRA, Paris.
7. Chen, Z.F., Zhao, Y., Zhu, Y., Yang, X., Qiao, J., Tian, Q., and Zhang, Q. 2009. Health risks of heavy metals in sewage-irrigated soils and edible seeds in Langfang of Hebei province, China. J. Sci. Food Agric. 90: 314-320.
8. Ebbs, S.D., and Kochian, L.V. 1997. Toxicity of zinc and copper to brassica species: Implications for phytoremediation. J. Environ. Qual.
9. Esmaeili, A. 2002. Pollutants, health and standard in environmental. (In Persian)
10. Feigl, G., Kumar, D., Lehotai, N., Tugyi, N., Molnar, A., Ordog, A., Szepesi, A., Gemes, K., Laskay, G., and Erdei, L. 2013. Physiological and morphological responses of the root system of Indian mustard (*Brassica juncea* L.) and rapeseed (*Brassica napus* L.) to copper stress. Ecotoxicol Environ Saf. 94: 179-189.
11. Fernandez, G.C.J. 1992. Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance. P 257-270, In: C.G. Kuo (Ed.), Proceedings of a Symposium on Adaptation of Vegetables and other Food Crops in Temperature and Water Stress. AVRDC Publications, Tainan, Taiwan.

12. Frey, B., Keller, C., Zierold, K., and Schulin, R. 2000. Distribution of Zn in functionally different leaf epidermal cells of the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *Plant Cell Environ.* 23: 675-687.
13. Hall, J.L. 2002. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. *J. Exp. Bot.* 53: 1-11.
14. Hamadouche, N.A., Aoumeur, H., Djedjai, S., Slimani, M., and Aoues, A. 2012. Phytoremediation potential of *Raphanus sativus* L. for lead contaminated soil. *Acta Biol. Szeged.* 56: 43-49.
15. Hamzehpour, N., Malekoti, M.J., and Majidi, A. 2010. Interaction of zinc, iron and manganese in different wheat organs. *J. Soil Res.* 24: 1-8.
16. Heiss, S., Wachter, A., Bogs, J., Cobbett, C., and Rausch, T. 2003. Phytochelatin synthase (PCS) protein is induced in *Brassica juncea* leaves after prolonged Cd exposure. *J. Exp. Bot.* 54: 1833-1839.
17. Huang, Y., Hu, Y., and Liu, Y. 2009. Combined toxicity of copper and cadmium to six rice genotypes (*Oryza sativa* L.). *J. Environ. Sci.* 21: 647-653.
18. John, R., Ahmad, P., Gadgil, K., and Sharma, S. 2009. Cadmium and lead-induced changes in lipid peroxidation, antioxidative enzymes and metal accumulation in *Brassica juncea* L. At three different growth stages. *Arch Agron Soil Sci.* 55: 395-405.
19. Kabata-Pendias, A. 2011. Trace elements in soils and plants. 4th ed. CRC Press, LLC. 42p.
20. Kabata-Pendias, A., and Pendias, H. 1999. Biogeochemistry of Trace Elements. 2nd ed., Wyd. Nauk PWN, Warsaw, 400p.
21. Kabata-Pendias, A., and Pendias, H. 2000. Trace Elements in Soils and Plants. 3rd Edn., CRC Press Inc., Boca Raton, USA.
22. Kabata-Pendias, A., and Pendias, H. 2001. Trace Elements in Soils and Plants. Florida: Boca Raton.
23. Karbassi, A., and Bayati, A. 2001. Environmental geochemistry. Kavosh qalam Publications, Tehran, Iran. (In Persian)
24. Khatib, M., Rashed Mohasel, M., Ganjali, A., and Lahouti, M. 2008. The effects of different nickel concentrations on some morpho-physiological characteristics of parsley (*Petroselinum crispum*). *Iran J. Field Crops Res.* 2: 295-302.
25. Kloke, A., Sauerbeck, D.R., and Vetter, H. 1984. The contamination of plants and soils with heavy metals and the transport of metals in terrestrial food chains, in *Changing Metal Cycles and Human Health*, Nriagu, J.O., ed., Dahlem, Konferenzen, Springer-Verlag, Berlin, 113p.
26. Klute, A. 1986. Method of soil analysis. Part1: Physical methods. *Soi. Sci Soc. Am. J.* Pp: 432-449.
27. Macnicol, R.D., and Beckett, P.H.T. 1985. Critical tissue concentrations of potentially toxic elements. *Plant Soil.* 85: 1075.
28. Mattina, M.J.I., Lannucci-Berger, W., Musante, C., and White, J.C. 2003. Concurrent plant uptake of heavy metals and persistent organic pollutants from soil. *Environ Pollut.* 124: 375-378.
29. Motesharezadeh, B., and Savaghebi, Gh. 2011. Study of Sunflower Plant Response to Cadmium and Lead Toxicity by Usage of PGPR in a Calcareous Soil. *J. Water Soil.* 25: 1069-1079. (In Persian)
30. Moustakes, M., Eleftheriou, E.P., and Ouzouxidou, G. 1997. Short-term effects of aluminium at alkaline pH on the structure and function of the photosynthetic apparatus. *Photosynthetica.* 34: 169-177.
31. Quartacci, A., Mike, F., Barbara Irtelli, A., Alan, J.M., Baker, B., and Flavia, N.I. 2007. The use of NTA and EDDS for enhanced phytoextraction of metals from a multiply contaminated soil by *Brassica carinata*. *Chemosphere.* 68: 1920-1928.
32. Rashid Shomali, A., Khodaverdiloo, H., and Samadi, A. 2012. Accumulation and tolerance of soil cadmium contamination by Millet (*Pennisetum glaucum*), Lambsquarter (*Chenopodium album*), Flix weed (*Descurainia Sophi*) and purslane (*Portulaca oleracea*). *J. Soil Manage. Sustain. Prod.* 2: 45-62. (In Persian)

33. Raymond, A.W., and Okieimen, F.E. 2011. Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation, *Isrn Ecology*, Pp: 1-20.
34. Raymond, O.A., and Harrison, I.A. 2017. Assessment of Plants at Petroleum Contaminated Site for Phytoremediation. *Proceedings of the International Conference of Recent Trends in Environmental Science and Engineering*, Toronto, Canada, 105p.
35. Schnoor, J.L. 1997. *Phytoremediation*. The University of Iowa, Department of Civil and Environmental Engineering and Center for Global and Regional Environmental Research.
36. Torresdey, G., Videira, J.R.P., Rosa, G., and Parsons, J.G. 2005. Phytoremediation of heavy metals and study of the metal coordination by X-ray absorption spectroscopy. *Coord Chem. Rev.* 249: 1797-1810.
37. Vaillant, N., Monnet, F., Hitmi, A., Sallanon, H., and Coudret, A. 2005. Comparative study of responses in four *Datura* species to a zinc stress. *Chemosphere*. 59: 1005-1013.
38. Zhao, Z.Q., Zhu, Y.G., Kneer, R., and Smith, S.E. 2005. Effect of zinc on cadmium toxicity-induced oxidative stress in winter wheat seedlings. *J. Plant Nutr.* 28: 1947-1959.



Impacts of different soil zinc levels on growth and Zn accumulation in Ethiopian mustard (*Brassica carinata*) and Indian mustard (*Brassica juncea*) with emphasis on phytoremediation

Z. Soleimannejad¹, *A. Abdolzadeh² and H.R. Sadeghipour³

¹Ph.D. Student, Dept. of Biology, University of Golestan, ²Professor, Dept. of Biology,
University of Golestan, ³Associate Prof., Dept. of Biology, University of Golestan

Received: 07/22/2017; Accepted: 11/28/2017

Abstract

Background and Objectives: The current development of industry and technology has been associated with the entry of environmental pollutants and particularly heavy metals into the soil and accordingly it raised the safety concerns of the international community. Zinc is an essential heavy metal in plants which involves in many biological functions, but at high concentrations inhibits plants growth and development and may endanger the health of human and other organisms in case of plant consumption. It can play catalytic, cocatalytic (coactive), or structural roles in a large number of enzymes and is involved in the biosynthesis and catabolism of proteins, nucleic acids, carbohydrates and lipids. In this research the tolerance of Ethiopian and Indian mustards grown in soils contaminated with different Zn concentrations and the accumulation of this element in these plants were investigated to assess their phytoremediation potentials.

Materials and Methods: Plants were grown in greenhouse in soils contaminated with 500 and 1000 mg kg⁻¹ of zinc. The experiment was carried out in a factorial completely randomized design. Factor one was Zn and factor two was plant species. They were harvested after 7 weeks of growth at the beginning of the reproductive phase and assayed for growth characteristics and Zn concentration and photosynthetic pigments content.

Results: The results showed that Zn treatments had no significant effect on growth parameters of both species except decrease in root length of Ethiopian mustard under 1000 mg kg⁻¹ Zn. Both species indicated great stress tolerance index to zinc. As soil zinc contamination increased, the concentration of Zn increased significantly in roots and shoots of both Ethiopian and Indian mustards. The greatest bioconcentration factor in root and shoot and translocation factor in both plants were observed under 500 mg kg⁻¹ Zn treatment. In Ethiopian mustard, 1000 mg kg⁻¹ Zn treatment reduced chlorophyll a and the ratio of total chlorophyll to carotenoids, however, Zn treatments did not affect significantly the photosynthetic pigments in Indian mustard.

Conclusion: Both species are able to tolerate and accumulate Zn under different Zn contamination levels, thus in both species increased soil Zn contamination led to increased stress tolerance index. The highest bioconcentration and translocation factors in both plants occurred under 500 mg kg⁻¹ Zn. Under 1000 mg kg⁻¹ Zn, Indian mustard accumulated 0.05% Zn in shoots which was greater 1.5 fold than Ethiopian mustard. Accordingly, Indian mustard has greater competence for phytoremediation of Zn contaminated soils compared to Ethiopian mustard.

Keywords: Soil contamination, Zinc, Brassicaceae, Tolerance, Phytoremediation

* Corresponding Author; Email: ah_ab99@yahoo.com

