نشریهٔ محیط زیست طبیعی، مجلهٔ منابع طبیعی ایران، دورهٔ ۶۶، شمارهٔ ۳، پائیز۱۳۹۲
صفحات ۳۲۸ - ۳۱۹

نقش مادهٔ آلی در کارایی گیاه‌پالایی نهال‌های سپیدار در خاک آلوده به فلز کروم (VI)

سید مهدی علی‌زاده*

استادیار دانشکدهٔ کشاورزی دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۳/۲۸ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۲/۶/۱۶)

چکیده

فلز کروم، به‌دلیل کاربرد گسترده در صنعت، آلاینده‌ای جدی برای محیط‌زیست شناخته شده است. گیاه‌پالایی روشی کارا، اقتصادی و سازگار به‌لحاظ زیستی برای پالایش خاک‌های آلوده است. تحقیق حاضر با هدف بررسی توانایی استخراج فلز کروم (VI) از خاک آلوده با قلمه‌های ریشه‌دار یک‌سالهٔ سپیدار و در حضور کوکوپیت، خاکبرگ و پیت‌ماس به‌مثابهٔ مواد آلی اجرا شد. سه بستر کاشت بهبودیافته (خاک و کوکوپیت، خاک و خاکبرگ، خاک و پیت‌ماس) با استفاده از مواد آلی مذکور و یک بستر خاک (به‌مثابهٔ شاهد) تهیه شد. چهار غلظت فلز کروم (VI) شامل صفر، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم به‌صورت نمک دی‌کرومات پتاسیم به بسترهای کاشت اضافه شد. در پایان فصل رویش، نمونه‌ها هضم شدند و مقدار فلز کروم در اندام‌های گیاهی (ریشه، ساقه و برگ) اندازه‌گیری شد. بسترهای کاشت بهبودیافته توانستند مقدار جذب کل فلز کروم توسط گیاه را در مقایسه با بستر کاشت شاهد تا نزدیک به دو برابر ارتقا دهند. بیشترین و کمترین مقدار جذب کل (۵۴/۶۴ و ۲/۸۱ $\mu g\ gr^{-1}$) به‌ترتیب در حضور کوکوپیت در سطح آلودگی ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و خاک در سطح آلودگی صفر مشاهده شد. استفاده از کلات‌کننده‌های شیمیایی در جهت افزایش حلالیت فلزات و ارتقای کارایی گیاه‌پالایی آثار زیست‌محیطی متعددی به‌همراه دارد. نتیجهٔ تحقیق حاضر به‌مثابهٔ یافته‌ای سازگار با طبیعت می‌تواند برای کمک به فرآیند گیاه‌پالایی مطرح باشد.

واژگان کلیدی

آلاینده، پیت‌ماس، خاکبرگ، دی‌کرومات پتاسیم، کوکوپیت.

*نویسنده مسئول تلفن: ۰۹۱۶۳۱۱۸۴۴۶
Email: s_malizadeh@yahoo.com

۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر، آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی به فلز کروم در اثر فعالیت‌های انسانی به ایجاد نگرانی در جامعهٔ محققان علوم گیاهی و حیوانی منجر شده است (Shanker *et al*., 2005). ازآنجاکه کروم (VI) گونهٔ اصلی فلز کروم مورد استفاده در فعالیت‌های صنعتی نظیر تولید آهن و فولاد، چوب، چرم‌سازی، آبکاری و صنایعی از این دست است، می‌توان فرآیندهای صنعتی را مسبب اصلی آلودگی محیط‌زیست به فلز کروم برشمرد (Salunkhe *et al*., 1998). آلودگی خاک‌ها به پساب‌های صنعتی پیامدهای متعددی در پی دارد. اثرهای منفی بر خصوصیات خاک و همچنین آثار سوء بر رشد و عملکرد محصولات زراعی (Kumar, 2000) بخشی از پیامدهای آلودگی خاک‌ها به فلزات سنگین به‌طور کلی و فلز کروم به‌طور موردی‌اند. از سوی دیگر، فرم محلول ترکیبات کروم (VI) در صورت استنشاق و تماس با پوست، به‌ویژه در غلظت‌های بالا، بسیار سمی و خطرناک است. اختلال در سیستم کلیوی و کبد، آسم، بروز حساسیت‌های پوستی و سرطان ریه و معده از عوارض قرارگرفتن در معرض فلز کروم‌اند (ATSDR, 2002). سازوکارهای سرطان‌زایی کروم (VI) به‌طور گسترده در منابع بررسی شده است (Stoecker, 2004). نظام‌نامه‌های گوناگونی برای سطح مجاز فلز کروم در محیط‌زیست وجود دارد، اما سازمان بهداشت جهانی این مقدار را ۵۰ میکروگرم در لیتر ($\mu g\ l^{-1}$) اعلام کرده است (Oze *et al*., 2007).

یون‌های کرومات می‌توانند به‌راحتی به لایه‌های پایین‌تر خاک حرکت کنند و به آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی منجر شوند، اما امکان جذب آنها توسط ریشهٔ گیاهان هم وجود دارد (Calder, 1998). گیاه‌پالایی، از بهترین روش‌های اکولوژیک زدودن آلاینده‌ها از محیط (به‌ویژه خاک) است. این روش برای پاک‌سازی طیفی از آلاینده‌ها مؤثر است (Pilon-Smits, 2005). در این روش ترکیبی، با به‌کارگیری هم‌زمان گیاه، اصلاحگرهای خاک و فعالیت‌های زراعی، آلاینده‌ها از محیط‌زیست حذف می‌شوند و سمیت آنها کاهش می‌یابد (Salt *et al*., 1998). گیاه مورد استفاده در فناوری گیاه‌پالایی باید قادر به تولید زی‌تودهٔ زیاد، مقاوم به سمیت فلزات و همچنین قادر به جذب آنها در غلظت‌های بالا در اندام‌های هوایی خود باشد (Kabata-Pendias and Mukherjee, 2007). توانایی گیاه برای تحمل غلظت‌های بالای آلاینده در محیط و تولید زی‌تودهٔ زیاد دو شرط لازم برای موفقیت گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده است (Shen, *et al*., 2002). گیاهانی با عنوان "بیش‌اندوز" قادرند مقادیر زیادی از فلز را در اندام‌های خود انباشته کنند، اما تولید زی‌تودهٔ کم و اختصاصی عمل‌کردن درمورد فلزات از کاستی‌های آنهاست (Begonia *et al*., 2005). امروزه از عوامل شیمیایی متعددی برای افزایش حلالیت فلزات و ارتقای کارایی گیاه‌پالایی استفاده می‌شود که خطر نفوذ و انتقال فلزات به افق‌های زیرین خاک، آب‌های زیرزمینی و یا سطحی را افزایش می‌دهد و ممکن است به سمی‌شدن گیاهان و ریزجانداران خاک منجر شود (Santos *et al*., 2006). بنابراین، استفاده از مواد و روش‌های سازگار با محیط‌زیست مطلوب‌تر و در اولویت خواهد بود.

با توجه به توانایی سپیدار در تولید زی‌تودهٔ بیشتر در مقایسه با سایر گونه‌ها، سیستم ریشه‌ای گسترده، تکثیر آسان (Castiglione *et al*., 2007) و نرخ تبخیر بالا و به تبع آن امکان انتقال بیشتر آلاینده به اندام‌های هوایی از این طریق، هدف از این پژوهش بررسی توان گیاه‌پالایی فلز کروم (VI) توسط نهال‌های یک‌سالهٔ سپیدار در غلظت‌های گوناگون آلودگی و همچنین بررسی تأثیر افزودن مادهٔ آلی به خاک در ارتقای کارایی گیاه‌پالایی بود.

۲. مواد و روش‌ها

این پژوهش در قالب طرح آزمایشی فاکتوریل، با طرح پایهٔ کاملاً تصادفی در سه تکرار انجام شد. فاکتورهای مورد بررسی شامل بسترهای کاشت و غلظت‌های آلودگی کروم بود. تجزیهٔ آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS و مقایسهٔ میانگین‌ها به روش توکی (آمارهٔ HSD[1]) در سطح یک درصد انجام شد.

خاک غیرآلودهٔ مورد استفاده در این آزمایش از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری مزرعهٔ آموزشی-پژوهشی دانشگاه تهران (E ′۵۷ °۵۰ و N ′۴۸ °۳۵) تهیه شد.

1. Highest Significant Difference

خاک مذکور، پس از خشک‌شدن در معرض هوا، از الک دو میلی‌متری عبور داده و به‌طور کامل مخلوط شد و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن با استفاده از روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شدند. برای تهیهٔ نهال‌ها، یک سال قبل از اجرای آزمایش، قلمه‌هایی یکسان با طول (۳ ± ۲۵ cm)، قطر (۱ ± ۸ mm) و تعداد هشت جوانه از یک درخت مادری منفرد سپیدار (*Populus alba* L.) تهیه و برای ریشه‌دارشدن به‌مدت یک‌سال در نهالستان مسیر سبز شهرستان کرج مراقبت و نگهداری شدند. سال بعد از بین قلمه‌های ریشه‌دار انتخاب مجدد صورت گرفت و نهال‌هایی که از نظر صفات مذکور یکسان بودند برای آزمایش گلدانی در نظر گرفته شدند.

خاکبرگ، کوکوپیت و پیت‌ماس، به‌دلیل دارابودن مقادیر زیاد مادهٔ آلی (اصلاحگر)، برای تهیهٔ بسترهای کاشت درنظر گرفته شدند. ویژگی‌های شیمیایی اصلاحگرهای مذکور در جدول ۱ ارائه شده است. در این آزمایش چهار بستر کاشت در نظر گرفته شد. بستر کاشت یک شامل خاک و کوکوپیت هرکدام به‌اندازهٔ نصف حجم گلدان، بستر کاشت دو شامل خاک و خاکبرگ هرکدام به‌اندازهٔ نصف حجم گلدان، بستر کاشت سه شامل خاک و پیت‌ماس هرکدام به‌اندازهٔ نصف حجم گلدان و بستر کاشت چهار خاک (بدون افزودن مادهٔ آلی) به‌مثابهٔ بستر کاشت شاهد تعریف شدند.

از نمک دی‌کرومات پتاسیم ($K_2Cr_2O_7$) برای آلوده‌کردن خاک استفاده شد. بسترهای کاشت تهیه‌شده با مقادیر ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کروم در خارج از گلدان‌ها به‌صورت یکنواخت آلوده و سپس گلدان‌ها با آن پر شدند. در این آزمایش از گلدان‌های پلاستیکی با ظرفیت ۲۵ لیتر استفاده شد. پس از آلوده‌کردن بسترهای کاشت، برای رسیدن به حالت تعادل به‌مدت یک ماه به حال خود رها شدند (Alizadeh *et al.*, 2012). پس از انتقال نهال‌ها به گلدان‌ها (در زمستان)، با توجه به نتایج آنالیز خاک، کودهای اوره و سولفات پتاسیم برای جلوگیری از کمبود این دو عنصر در نهال‌ها به خاک اضافه شد. در طول دورهٔ رویش، رطوبت خاک حدود ۷۰ تا ۹۰ درصد رطوبت مزرعه‌ای و از طریق توزین گلدان‌ها در طول آزمایش حفظ شد. این عمل با آبیاری یک‌روز درمیان گلدان‌ها در فصل بهار و هرروزه در فصل تابستان انجام شد.

جدول ۱. ویژگی‌های شیمیایی اصلاحگرهای مورد استفاده

مشخصه	کوکوپیت	خاکبرگ	پیت‌ماس
مقدار نمک	۱/۱۲ $g\ l^{-1}$	۱/۲ $g\ kg^{-1}$	۰/۹۵ $g\ l^{-1}$
مقدار مادهٔ آلی	٪ ۸۶	٪ ۳۸	٪ ۹۶
pH	۶/۱	۶/۲	۵/۷
K_2O	۲۶۴ $mg\ l^{-1}$	٪ ۷۸	۱۷۸ $mg\ l^{-1}$
P_2O_5	۹۳ $mg\ l^{-1}$	۲۳/۲ $mg\ kg^{-1}$	۸۳ $mg\ l^{-1}$
N	۸۵ $mg\ l^{-1}$	٪ ۰/۷۴	۸۱ $mg\ l^{-1}$
مقدار فلز کروم	–	–	–

در پایان دورهٔ رویش (پایان شهریور)، نهال‌ها از گلدان‌ها خارج و، پس از شست‌وشوی کامل با آب مقطر، در آون در دمای ۷۰ درجهٔ سلسیوس خشک شدند و وزن زی‌توده برای هرکدام از اندام‌های گیاه (ریشه، ساقه/شاخه‌ها و برگ) ثبت شد. سپس، برای اندازه‌گیری مقدار کروم جذب‌شده توسط نهال‌ها، اندام‌های گیاهی با آسیاب کاملا خرد و با روش هضم تر (با استفاده از اسید سولفوریک غلیظ، آب اکسیژنه و دستگاه دایجسدال) هضم شدند و مقدار فلز کروم در هر نمونه با دستگاه ICP-OES[1] تعیین شد (Vicentim and Ferraz, 2007).

1. Inductively Coupled Plasma – Optical Emission Spectroscopy

۳. نتایج

نام علمی خاک مورد استفاده در این مطالعه Finely loamy, Mixed, Xeric Haplocambids, Super active thermic و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن در جدول ۲ ارائه شده است. اثرهای اصلی سطح آلودگی و بستر کاشت درمورد تولید زی‌تودهٔ برگ، ساقه/شاخه و ریشه در سطح یک درصد معنی‌دار بود. اثر متقابل سطوح آلودگی و بستر کاشت در مورد تولید زی‌تودهٔ ساقه/شاخه معنی‌دار، اما ازنظر تولید زی‌تودهٔ برگ و ریشه غیرمعنی‌دار بود (جدول ۳). طبق نتایج ارائه‌شده در جدول ۴، بیشترین مقدار تولید زی‌تودهٔ برگ و ساقه/شاخه به‌ترتیب ۱۵۲/۷۳ و ۲۵۳/۳۳ گرم وزن خشک، در سطح آلودگی صفر و بستر کاشت دو (خاک و خاکبرگ)، مشاهده شد. بیشترین مقدار تولید زی‌تودهٔ ریشه در سطح آلودگی صفر کروم در بستر کاشت یک (خاک و کوکوپیت) اتفاق افتاد. کمترین مقدار تولید زی‌تودهٔ برگ، ساقه/شاخه و ریشه نیز مربوط به سطح آلودگی ۱۵۰ میلی‌گرم کروم در بستر کاشت چهار (خاک) و به‌ترتیب ۳۹/۷۳، ۱۰۴/۹۳ و ۲۸/۴۳ گرم وزن خشک بود. بیشترین مقدار افزایش تولید زی‌تودهٔ برگ تحت تأثیر بسترهای کاشت اعمال‌شده به تفاوت بستر کاشت یک و شاهد (خاک) به‌اندازهٔ ۵۴/۱۷ گرم وزن خشک مربوط بود. این مقدار درمورد تولید زی‌تودهٔ ساقه/شاخه و ریشه به‌ترتیب در بستر کاشت یک سطح آلودگی ۵۰ میلی‌گرم و بستر کاشت دو سطح آلودگی ۱۵۰ میلی‌گرم کروم رخ داد (جدول ۴).

جدول ۲.خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

خصوصیت	مقدار	خصوصیت	مقدار
شن (درصد)	۴۱	درصد آهک	۱۳/۲
سیلت (درصد)	۳۵	کروم استخراج‌شدنی با DTPA[1] (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	۰/۰۹
رس (درصد)	۲۴	ظرفیت تبادل کاتیونی (سانتی‌مول بار بر کیلوگرم)	۲۵
کربن آلی (درصد)	۰/۸۶	فسفر جذب‌شدنی (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	۱۸
نیتروژن (درصد)	۰/۰۷۶	پتاسیم جذب‌شدنی (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	۲۳۲
EC (دسی‌زیمنس بر متر)	۴/۴۲	مس استخراج‌شدنی با DTPA (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	۰/۰۰۲
pH	۷/۵	آهن استخراج‌شدنی با DTPA (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	۵/۱
کربنات کلسیم معادل (درصد)	۸/۱	روی استخراج‌شدنی با DTPA (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	۱/۰۱
Field Capacity (F.C) (درصد)	۲۶	منگنز استخراج‌شدنی با DTPA (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	۷/۸۵۴

جدول ۳. نتایج جدول تجزیهٔ واریانس تولید زی‌تودهٔ نهال‌های سپیدار

منابع تغییر		میانگین مربعات		
	درجهٔ آزادی (df)	زی‌تودهٔ برگ (g)	زی‌تودهٔ ساقه/شاخه (g)	زی‌تودهٔ ریشه (g)
سطح آلودگی	۳	۱۱۱۵۳/۰۹**	۲۲۵۶۷/۰۲**	۶۴۸/۳۲**
بستر کاشت	۳	۴۸۱۶/۴۹**	۵۵۷۷/۱**	۴۵۲/۵۲**
سطح آلودگی×بستر کاشت	۹	۱۱۸/۷۷ns	۱۰۸/۶۱**	۵/۹۳ns
ضریب تغییرات		۱۰/۰۷	۷/۶۵	۴/۷۷

**: معنی‌داری در سطح یک درصد
ns: نبودن اختلاف معنی‌دار

1. Diethylene Triamine Pentaacetic Acid

نتایج تجزیهٔ واریانس انباشت کروم در اندام‌های گیاهی و جذب کل کروم در جدول ۵ نشان داده شده است. همان‌طورکه در جدول ۵ مشاهده می‌شود، کلیهٔ اثرهای اصلی سطوح آلودگی و بستر کاشت و اثرهای متقابل آنها درمورد همهٔ صفات انباشت و جذب کل غیر از اثر متقابل دربارهٔ انباشت برگی کروم در سطح یک درصد معنی‌دارند. شکل‌های ۱ تا ۳ به‌ترتیب نتایج انباشت کروم در برگ، ساقه/شاخه و ریشهٔ نهال‌های سپیدار در بسترهای گوناگون کاشت و سطوح گوناگون آلودگی را نشان می‌دهند. بیشترین مقدار انباشت کروم در برگ‌ها در بستر کاشت یک و سطح آلودگی ۱۵۰ میلی‌گرم کروم ثبت شد. در مقدار انباشت برگی بین بسترهای بهبودیافته با یکدیگر و با بستر کاشت شاهد هیچ‌گونه تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد، به‌استثنای حالت سطح آلودگی ۵۰ میلی‌گرم که بین بستر کاشت دو (خاک و خاکبرگ) با سایر بسترها اختلاف معنی‌داری ایجاد شد (شکل ۱).

جدول ۴.مقادیر زی‌تودهٔ تولیدشده توسط نهال‌های سپیدار در بسترهای گوناگون کاشت در حضور سطوح آلودگی کروم (VI)

بستر کاشت	سطح آلودگی ($mg\ kg^{-1}$)	زی‌تودهٔ برگ (g)	زی‌تودهٔ ساقه/شاخه (g)	زی‌تودهٔ ریشه (g)
خاک و کوکوپیت	۰	۱۳۴/۱۳(ab)	۲۴۰/۸۶(ab)	۵۸/۴۳(a)
	۵۰	۱۲۷/۱۳(ab)	۲۲۳/۶۳(b)	۵۵/۸۶(ab)
	۱۰۰	۸۱/۰۶(cd)	۱۶۷/۸(d)	۴۹/۴۶(bcd)
	۱۵۰	۷۹/۴۳(cd)	۱۵۴/۲۳(ed)	۴۳/۰۶(de)
خاک و خاکبرگ	۰	۱۵۲/۷۳(a)	۲۵۳/۳۳(a)	۶۱/۴۳(a)
	۵۰	۱۱۰/۸۶(abc)	۲۰۴/۲۶(c)	۵۸/۳۳(a)
	۱۰۰	۸۴/۳(cd)	۱۷۰/۸(d)	۵۴/۷۶(abc)
	۱۵۰	۷۶/۸۶(d)	۱۵۳/۶۶(ed)	۴۶/۸(cde)
خاک و پیت ماس	۰	۱۳۹/۲۶(a)	۲۴۶/۰۳(a)	۵۸/۱۶(a)
	۵۰	۱۰۶/۱(abcd)	۲۰۲/۵۶(c)	۵۴/۴۶(abc)
	۱۰۰	۷۷/۷(cd)	۱۶۲/۹۳(ed)	۴۸/۸۶(bcd)
	۱۵۰	۷۲/۲(de)	۱۴۹/۱(e)	۴۱/۷۶(de)
خاک (شاهد)	۰	۱۰۱/۵(bcd)	۲۰۵/۶۶(c)	۴۹/۴(bcd)
	۵۰	۷۲/۹۶(de)	۱۶۹/۳(d)	۴۵/۷(d)
	۱۰۰	۴۱/۶۶(e)	۱۲۵/۵۳(f)	۴۰/۴۳(e)
	۱۵۰	۳۹/۷۳(e)	۱۰۴/۹۳(g)	۲۸/۴۳(f)

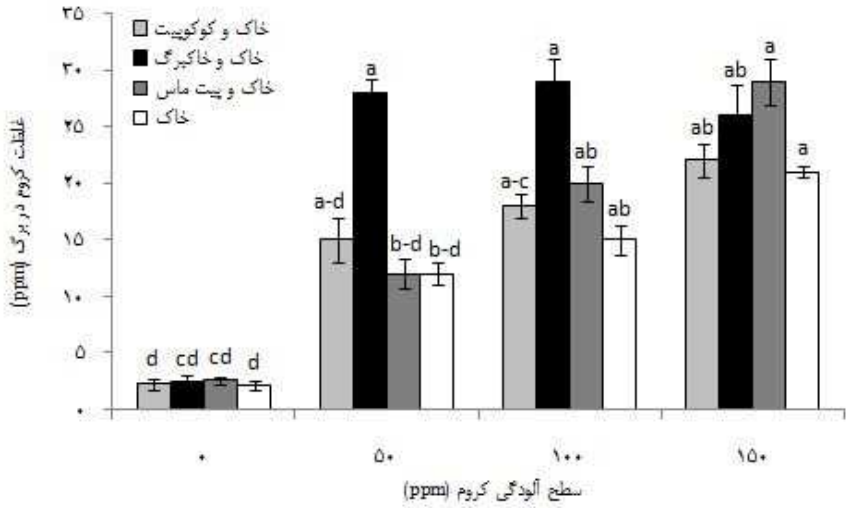
حروف مشابه در هر ستون نشان‌دهندهٔ نبودن تفاوت معنی‌دار بین اعداد در سطح یک درصد است.

جدول ۵. نتایج جدول تجزیهٔ واریانس انباشت کروم فلز (VI) در اندام‌های گوناگون نهال‌های سپیدار

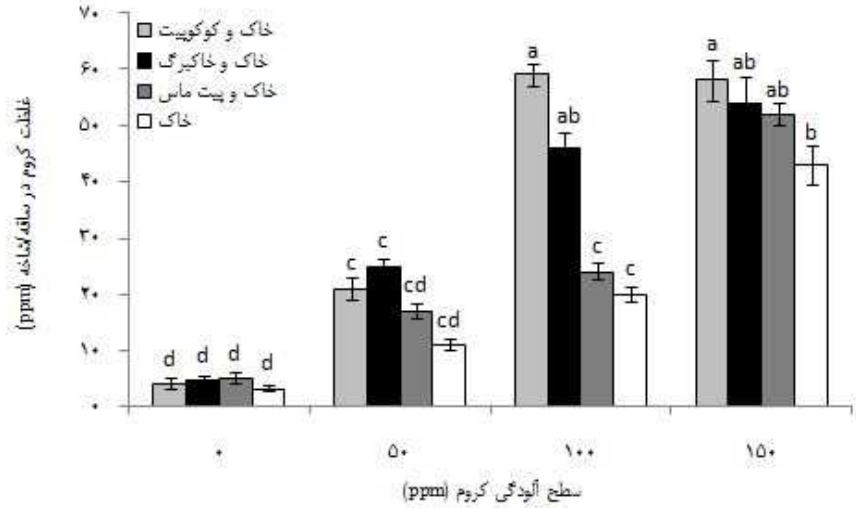
منابع تغییر	میانگین مربعات				
	درجهٔ آزادی (df)	انباشت در برگ ($mg\ kg^{-1}$)	انباشت در ساقه/شاخه ($mg\ kg^{-1}$)	انباشت در ریشه ($mg\ kg^{-1}$)	جذب کل ($\mu g\ g^{-1}$)
سطح آلودگی	۳	۱۱۱۷/۵۳**	۵۴۰۴/۱۱**	۱۸۱۴۹/۰۴**	۳۳۵/۴**
بستر کاشت	۳	۱۷۴/۰۴**	۷۱۵/۵۳**	۱۳۰۶/۴۸**	۵۱۲/۲**
سطح آلودگی×بستر کاشت	۹	۵۰/۲۷ns	۲۰۱/۹۲**	۱۵۹/۵۹**	۴۳۵/۶۴**
ضریب تغییرات		۱۷/۵۷	۱۴/۰۶	۸/۷۲	۱۱/۰۳

**: معنی‌داری در سطح یک درصد

ns: نبودن اختلاف معنی‌دار

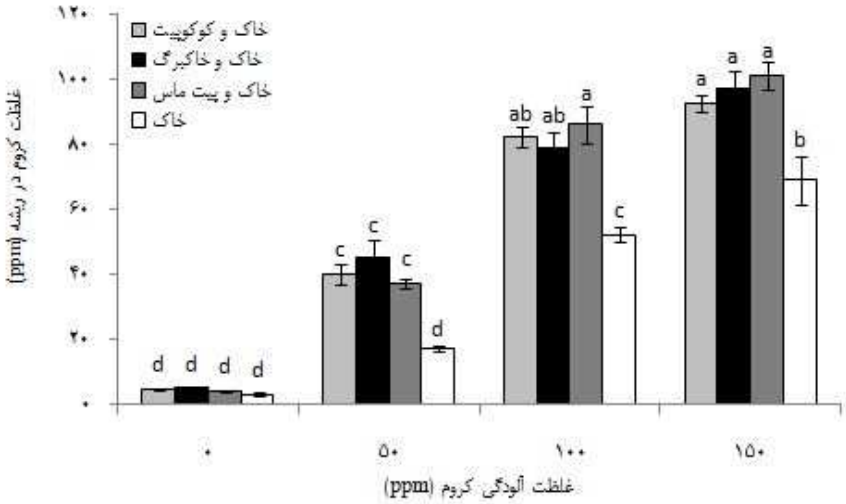


شکل ۱. مقایسهٔ مقادیر انباشت فلز کروم در برگ‌ها تحت تأثیر بسترهای کاشت و سطوح آلودگی ($P<0.01$)



شکل ۲. مقایسهٔ مقادیر انباشت فلز کروم در ساقه/شاخه تحت تأثیر بسترهای کاشت و سطوح آلودگی ($P<0.01$)

بسترهای کاشت اعمال‌شده نشان می‌دهد مقادیر انباشت کروم در ریشه در کلیهٔ بسترهای اصلاح‌شده با بستر کاشت شاهد (خاک) تفاوت معنی‌داری داشت. بیشترین مقدار انباشت در بستر کاشت یک در سطح آلودگی ۱۵۰ میلی‌گرم کروم ثبت شد. مقدار انباشت ریشه‌ای در بسترهای کاشت اصلاح‌شده در حد فاصل سطوح آلودگی ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم کروم معنی‌دار نبود، درحالی‌که در بستر کاشت شاهد روند افزایشی اختلاف معنی‌داری را نشان داد (شکل ۳). جدول ۶ مقادیر جذب کل کروم در نهال‌های سپیدار تحت تأثیر تیمارهای سطوح آلودگی کروم و بسترهای کاشت را نشان می‌دهد. جذب کل عبارت از تمام مقدار انباشت آلاینده در کلیهٔ اندام‌های یک گیاه است. به‌استثنای بستر کاشت یک در حد فاصل سطوح آلودگی ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم کروم، روند افزایشی جذب کل با افزایش سطح آلودگی کاملاً مشهود است. بیشترین مقدار جذب کل در بسترکاشت یک و سطح آلودگی ۱۰۰ میلی‌گرم کروم ثبت شد، درحالی‌که کمترین مقدار در هر سطح آلودگی به بستر کاشت شاهد مربوط بود.



شکل ۳. مقایسهٔ مقادیر انباشت فلز کروم در ریشه تحت تأثیر بسترهای کاشت و سطوح آلودگی ($P<0.01$)

جدول (۶): مقادیر جذب کل فلز کروم (VI) ($\mu g\ g^{-1}$) در سطوح گوناگون آلودگی و بسترهای گوناگون کاشت توسط نهال‌های سپیدار

بستر کاشت	سطح آلودگی ($mg\ kg^{-1}$)			
	۰	۵۰	۱۰۰	۱۵۰
خاک و کوکوپیت	۳/۵۲(gh)	۲۱/۷۱(cde)	۵۱/۷۱(a)	۵۴/۶۴(a)
خاک و خاکبرگ	۳/۹۲(gh)	۲۹/۱۰(bc)	۴۷/۹۲(a)	۵۳/۶۲(a)
خاک و پیت‌ماس	۴/۰۱(gh)	۱۸/۴۴(def)	۳۳/۳۴(cd)	۵۳/۴۶(ab)
خاک (شاهد)	۲/۸۱(h)	۱۲/۱۰(fgh)	۲۵/۱۶(efg)	۴۱/۹۶(cdef)

حروف مشابه در هر ستون نشان‌دهندهٔ نبودن تفاوت معنی‌دار بین اعداد در سطح یک درصد است.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق توان گیاه‌پالایی فلز کروم (VI) توسط نهال‌های ریشه‌دار یک‌سالهٔ سپیدار در غلظت‌های گوناگون آلودگی بررسی شد. بین گیاهان مورد استفاده در فرآیند گیاه‌پالایی، جنس صنوبر، به‌دلیل توانایی در تولید زی‌تودهٔ زیاد و نرخ تبخیر بالا، کانون توجه پژوهش‌های گیاه‌پالایی است. براساس بررسی‌های به‌عمل‌آمده، تاکنون پژوهشی دربارهٔ گیاه‌پالایی فلز کروم توسط جنس صنوبر صورت نگرفته، اما توانایی صنوبر در گیاه‌پالایی سایر فلزات سنگین و آلاینده‌ها به‌طور گسترده بررسی شده است (Alizadeh *et al.*, 2012; Wu *et al.*, 2010; Biro and Takacs, 2007; Castiglione *et al.*, 2007). همان‌طورکه در بخش نتایج ارائه شد، نهال‌های سپیدار توانایی بالایی در گیاه‌پالایی فلز کروم از خود بروز دادند که به تولید زیاد زی‌توده توسط این گونه و نرخ تبخیر بالای آن برمی‌گردد. Biro and Takacs (2007) و Marin و همکاران (2009) به توان بالای *P. nigra* و *P. tremula* در گیاه‌پالایی فلز سرب اشاره کردند. Wu و همکاران (2010)، Di Lonardo و همکاران (2010) و Justin و همکاران (2010) به‌ترتیب توانایی قلمه‌های هیبرید *P. nigra* × *P. deltoides*، *P. alba* و *P. deltoides* در گیاه‌پالایی فلز کادمیوم را مناسب ارزیابی کردند. در کلیهٔ بسترهای کاشت، تولید زی‌توده توسط نهال‌ها با افزایش سطوح آلودگی کاهش یافت. کاهش زی‌تودهٔ برگی ممکن است به‌دلیل کاهش تعداد و اندازهٔ سلول‌های برگ باشد (Nieman, 1965). کاهش زی‌تودهٔ ریشه احتمالاً به‌دلیل ایجاد اختلال در فرآیند تقسیم سلولی و کمبود عناصر غذایی در گیاه است (Foy, 1998).

کاهش ارتفاع گیاه نیز ممکن است به‌دلیل کاهش رشد ریشه و به‌دنبال آن انتقال کمتر آب و مواد غذایی به بخش‌های هوایی گیاه باشد. همان‌طورکه در شکل‌های ۱ تا ۳ نشان داده شده است، در کلیهٔ بسترهای کاشت، روند انباشت فلز کروم در اندام‌های گوناگون نهال‌های سپیدار به‌صورت ریشه>ساقه/شاخه>برگ بود. Pilon-smits و همکاران (1998) روند مشابهی را درمورد انباشت فلز کادمیوم در اندام‌های صنوبر هیبرید *P. alba* × *P. tremula* گزارش کردند. Biro و Takacs (2007) در تحقیقی روند برگ>ریشه>ساقه/شاخه را درمورد انباشت کادمیوم در *P. nigra* گزارش کردند. علت این تفاوت در روند انباشت ممکن است به نوع بستر کاشت برگردد (Wu *et al*., 2010).

امروزه از روش‌های متعددی برای ارتقای کارایی گیاه‌پالایی استفاده می‌شود که به آن گیاه‌پالایی کمکی اطلاق می‌شود. استفاده از گیاهان تراریخته، اعمال مواد شیمیایی گوناگون برای افزایش حلالیت فلزات ازجملهٔ این روش‌هاست. روش‌های سازگار با طبیعت از قبیل استعمال اصلاحگرهایی نظیر کودهای گاوی و کمپوست (Clemebte *et al*., 2006) و کود مرغی (Wei *et al*, 2010) نیز به این منظور اعمال می‌شود. در این تحقیق، به نقش مواد آلی در ارتقای کارایی گیاه‌پالایی فلز کروم نیز پرداخته شد. مواد آلی از طریق افزایش کارایی آب توسط گیاه، پایداری ساختار خاک، کاهش حساسیت خاک به فشردگی، دینامیک آب در خاک (Quiroga *et al*., 2006)، تثبیت توده‌های خاک و زیست فراهم‌کردن کاتیون‌های فلزی (Khaled and Fawy, 2011; Boguta and Sokolowska, 2012)، افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک (Bohn *et al*., 1985) و افزایش تهویه و بهبود ساختار خاک (Martínez-Fernández and Walker, 2011) سبب افزایش تولید زی‌تودهٔ گیاهی می‌شوند. Zalesny و همکاران (2007) بر نقش مثبت بسترهای کاشت در افزایش تولید زی‌تودهٔ گیاهی صنوبر هیبرید *P. deltoides* × *P. nigra* تأکید کردند. در این آزمایش، استفاده از مواد آلی در مقدار انباشت برگی کروم در مقایسه با بستر کاشت شاهد تأثیر معنی‌داری نداشت. این تأثیر درمورد انباشت ساقه/شاخه بیشتر و درمورد انباشت ریشه‌ای تفاوت بین بسترهای کاشت بهبودیافته با بستر شاهد در کلیهٔ سطوح آلودگی معنی‌دار بود (شکل‌های ۱-۳). اما تولید زی‌توده و انباشت کروم در اندام‌های گیاهی بین بسترهای کاشت بهبودیافته نیز متفاوت بود. دلیل این امر ممکن است به ساختار پیچیدهٔ مواد آلی برگردد (Kabata-Pendias and Mukherjee, 2007).

هدف اصلی از اجرای طرح‌های گیاه‌پالایی جذب و استخراج آلاینده از محیط خاک است. با توجه به نتایج ارائه‌شده در جدول ۶، بسترهای کاشت بهبودیافته سبب افزایش معنی‌دار جذب کل کروم از محیط خاک شدند، تاجایی‌که این افزایش در بستر کاشت یک نسبت به بستر کاشت شاهد به حدود دو برابر رسید. این تفاوت در مقدار جذب کل کروم از نقش مثبت مواد آلی در افزایش تولید زی‌تودهٔ گیاهی نشأت می‌گیرد. نتیجهٔ تحقیق حاضر به‌مثابهٔ یافته‌ای سازگار با طبیعت می‌تواند برای کمک به فرآیند گیاه‌پالایی مطرح باشد. اگرچه استفاده از عوامل شیمیایی نظیر EDTA[1]، سبب ارتقای چندین برابری انباشت فلزات (بسته‌به نوع گیاه، نوع فلز و شرایط محیط) در گیاه می‌شود (Doumett *et al*., 2008)، اما پیامدهایی هم‌چون تراوش و نفوذ آنها به افق‌های زیرین خاک، آب‌های زیرزمینی و یا سطحی و همچنین سمی‌شدن گیاهان و ریزجانداران خاک از نقاط ضعف این روش‌هاست (Santos *et al*., 2006). روش استفاده‌شده در این تحقیق برای ارتقای کارایی گیاه‌پالایی فاقد مسائل مذکور بود و راهکاری زیست‌محیطی محسوب می‌شود.

1. Ethylene Diamine Tetraacetic Acid

References

1. Alizadeh, S.M., Zahedi Amiri, G., Savaghebi-Firoozabadi, G., Etemad, V., Shirvany A., Shirmardi, M (2012) "Influence of soil amendment on cadmium accumulation responses in one-year old *Populus alba* L. seedling," *Iranian Journal of Forest*, 3 (4): 355-366. in Persian.
2. ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry) (2002) Draft Toxicological Profile for Several Trace Elements, U.S. Department of Health and Human Services, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Atlanta, GA.
3. Begonia, M.T., Begonia, G.B., Ighoavodha, M., Gilliard D (2005) "Lead accumulation by Tall Fescue (*Festuca arundinacea Schreb*) grown on a lead-contaminated soil," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2(2):228-223.
4. Biro, I., Takacs, T (2007) "Study of heavy metal uptake of *Populus nigra* in relation to phytoremediation," *Cereal Research Communications*, 35(2): 265-268.
5. Boguta, P., Sokolowska, Z (2012) "Influence of phosphate ions on buffer capacity of soil humic acids," *International Agrophysics*, 26: 7-14.
6. Bohn H., McNeal B., O'Connor, G., (Eds.), (1985) *Soil Chemistry*. , 2nd Ed., Wiley, New York., 1024.
7. Calder, L.M (1988) "Chromium contamination of ground water," In: Nriagu, J.O., Nieboer, E. (Eds.), *Chromium in Natural and Human Environments*, Wiley Interscience, New York, 215-231.
8. Castiglione, S., Franchin, C., Fossati, T., Lingua, G., Torrigiani, P., Biondi, S (2007) "High zinc concentrations reduce rooting capacity and alter metallothionein gene expression in white poplar (*Populus alba* L. cv. *Villafranca*)," *Chemosphere*, 67: 1117-1126.
9. Clemente R., Almela C.A. Bernal, M.P (2006) "A remediation strategy based on active phytoremediation followed by natural attenuation in a soil contaminated by pyrite waste," *Environmental Pollution*, 143: 397-406.
10. Di Lonardo, S., Capuana, M., Arnetoli, M., Gabbrielli, R., Gonnelli, C (2010) "Exploring the metal phytoremediation potential of three *Populus alba* L. clones using an in vitro screening," *Environmental Science and Pollution Research*, 18(1), 82-80.
11. Foy, C.D (1988) "Plant adaptation of acid, aluminiumtoxic soils, Communications" *Soil Science and Plant Analysis*, 19: 959-987.
12. Doumett, S., Lamperi, L., Checchini, L., Azzarello, E., Mugnai, S., Mancuso, S., Petruzzelli, G., Del Bubba M (2008) "Heavy metal distribution between contaminated soil and *Paulownia tomentosa*,in a pilot-scale assisted phytoremediation study: Influence of differentcomplexing agents," *Chemosphere*, 72: 1481-1490.
13. Justin, M,Z., Pajk, N., Zupanc, V., Zupancic, M (2010) "Phytoremediation of landfill leachate and compost wastewater by irrigation of *Populus* and *Salix*: Biomass and growth response," *Waste Management*, 30: 1032-1042.
14. Kabata-Pendias, A., Mukherjee, A.B., (Eds.) (2007) *Trace Elements From Soil to Human*, Speringer. 561.
15. Khaled, H., Fawy, H.A (2011) "Effect of different levels of humic acids on the nutrient content, plant growth, and soil properties under conditions of salinity," *Soil and Water Research*, 6(1): 21-29.
16. Kumar, A (2000) "Reclamation of soil polluted by industrial effluents using herbaceous flora," *Advances in Plant Sciences*, 13: 427-430.
17. Lindsay, W.L., Norvell, W.A (1978) "Development of DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper," *Soil science Society of America Journal*, 42: 421-428.
18. Marin, M., Varga, C., Mihaly-Cozmuta, L., Peter, A., Mihaly-Cozmuta, A., Boltea, D (2009) "Evaluation of the Phytoremediation Potential of the *Populus tremula* in Tailing Ponds," *Bulletin UASVM Agriculture*, 66 (2), 124-131.
19. Martínez-Fernández, D., Walker, D.J (2011) "The Effects of Soil Amendments on the Growth of *Atriplex halimus* and *Bituminaria bituminosa* in Heavy Metal-Contaminated Soils," *Water, Air, and Soil Pollution*, 223(1): 63-72.

20. Nieman, R.H (1965) "Expansion of bean leaves and its suppression by salinity," *Plant Physiology*, 40: 156-161.

21. Oze, Ch., Bird, D.G., Fendorf, S (2007) "Genesis of hexavalent chromium from natural sources in soil and groundwater," *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104 (16): 6544-6549.

22. Pilon-Smits, E (2005) "Phytoremediation," *Annual Review of Plant Biology*, 56: 15-39.

23. Pilon-Smits, E.A.H., de Souza, M.P., Lytle, C.M., Shang, C., Lugo, T., Terry, N (1998) "Selenium volatilization and assimilation by hybrid poplar (*Populus tremula×alba*)," *Journal of Experimental Botany*, 328(49): 1889-1892.

24. Quiroga, A., Funaro, D., Noellemeyer, E., Peinemann, N (2006) "Barley yield response to soil organic matter and texture in the Pampas of Argentina," *Soil and Tillage Research*, 90: 63-68.

25. Salt, D.E., Smith, R.D., Raskin, I (1998) "Phytoremediation," *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 49: 643-668.

26. Salunkhe, P.B., Dhakephalkar, P.K., Paknikar, K.M (1998) "Bioremediation of hexavalent chromium in soil microcosm," *Biotechnology Letters*, 20: 749-751.

27. Santos, F.S., Hernandez-Allica, J., Becerril, J.M., Amaral-Sobrinho, N., Mazur, N., Garbisu, C (2006) "Chelate-induced phytoextraction of metal polluted soils with Brachiaria decumbens," *Chemosphere*, 65: 43-50.

28. Shanker, A.K., Cervantes, C., Tavera, H.L., Avudainayagam, S (2005) "Chromium toxicity in plants," *Environment International*, 31: 739-753.

29. Shen, Z.G., Li, X,D., Wang, C.C., Chen, H.M., Chua, H (2002) "Lead phytoremediation from contaminated soil with high-biomass plant species," *Journal of Environmental Quality*, 31: 1893-1900.

30. Stoecker, B (2004) "Chromium," In: Merian, E., Anke, M., Ihnat, M., Stoeppler, M. (Eds.), *Elements and Their Compounds in the Environment*, 2nd ed., vol. 2. Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 709-729.

31. Vicentim, M.P., Ferraz, A (2007) "Enzyme production and chemical alterations of *Eucalyptus grandis* wood during biodegradation by *Ceriporiopsis subvermispora* in cultures supplemented with Mn^{2+}, corn steep liquor and glucose," *Enzyme and Microbial Technology*, 40: 645-652.

32. Wei, S., Li, Y., Zhoua, Q., Srivastavac, M., Chiud, S., Zhane, J., Wua, Z., Sun, T (2010) "Effect of fertilizer amendments on phytoremediation of Cd-contaminated soil by a newly discovered hyperaccumulator *Solanum nigrum* L," *Journal of Hazardous Materials*, 176: 269-273.

33. Wu, F., Yang, W., Zhang, J., Zhou, L (2010) "Cadmium accumulation and growth responses of a poplar (*Populus deltoids×Populus nigra*) in cadmium contaminated purple soil and alluvial soil," *Journal of Hazardous Materials*, 177: 268-273

34. Zalesny, J.A., Zalesny, R.S., Coyle, D.R., Hall, R.B (2007) "Growth and biomass of *Populus* irrigated with landfill leachate," *Forest Ecology and Management*, 248: 143-152.