

زنده‌مانی، رشد و غلظت سرب نهال سپیدار (*Populus alba* clone 44/9) در خاک آلوده به سرب

آزاده صالحی^۱، مسعود طبری کوچکسرایبی^{۲*} و انوشیروان شیروانی^۲

^۱ دانش‌آموخته دکتری جنگل‌داری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس

^۲ استاد دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس

^۲ استادیار گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۱/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۶/۲۹)

چکیده

پتانسیل گیاه‌پالایی کلون ۴۴/۹ سپیدار (*Populus alba*) به خاک آلوده به سرب (غلظت‌های ۰، ۱۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در یک آزمایش گلخانه‌ای در قالب طرح کاملاً تصادفی بررسی شد. در پایان فصل رویش، در خاک آلوده به ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب، زنده‌مانی، طول ساقه و قطر یقه نهال‌ها، و در خاک آلوده به ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب، زی‌توده‌های ریشه، ساقه، برگ و زی‌توده کل نهال و نیز نسبت ریشه به اندام هوایی در مقایسه با نهال‌های شاهد کاهش یافت. با افزایش غلظت سرب خاک، غلظت سرب اندام‌های گیاه افزایش یافت، به طوری که بیشترین غلظت سرب ریشه، ساقه و برگ (به ترتیب ۲۱۲/۳۸، ۹۵/۰۳ و ۴۲/۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در غلظت ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب خاک مشاهده شد. همچنین، در تمام سطوح تیمار سرب، بیشترین غلظت سرب به ریشه و کمترین آن به برگ تعلق داشت. فاکتور انتقال سرب به اندام هوایی در خاک‌های آلوده به سرب (نسبت به شاهد) افزایش یافت و بیشترین آن (۰/۷۴ و ۰/۷۲) به ترتیب در غلظت‌های ۱۰۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد. شاخص‌های مقاومت اندام‌ها (هوایی، حداقل ۸۰ درصد؛ و ریشه، حداقل ۴۵ درصد) نشان داد که این کلون مقاومت به نسبت خوبی حتی در مقابل بیشینه غلظت فلز سنگین سرب (۱۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) دارد. نظر به زنده‌مانی رضایت‌بخش، رویش مطلوب، شاخص مقاومت به نسبت خوب و بهبود تجمع سرب در اندام هوایی می‌توان گفت که این کلون توانایی پالایش خاک‌های آلوده به سرب تا ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم را دارد. از این‌رو، در تحقیقات آتی گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به سرب (به ویژه در آزمایش‌های عرصه و با غلظت‌های بیشتر سرب) این کلون می‌تواند مورد توجه پژوهشگران قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: آلودگی خاک، سپیدار، سرب، شاخص مقاومت، گیاه‌پالایی.

مقدمه

خاک به‌عنوان جزئی از بیوسفر نقش مهمی در تولید غذا و پایداری محیط زیست دارد. امروزه آلودگی خاک با فلزات سنگین به‌دلیل پایداری طولانی مدت فلزات سنگین در خاک و تأثیرات زیان‌بار بوم‌شناختی تبدیل به بحرانی زیست‌محیطی شده است (علی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۰؛ Bojarczuk and Kieliszewska-Rokicka, 2010). فلزات سنگین، عناصر فلزی با وزن مخصوص بیش از ۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب هستند (Torresday *et al.*, 2005). آلودگی بوم‌سازگان با فلزات سنگین از طریق فرسایش طبیعی سنگ‌ها و فعالیت‌های بشر از قبیل احتراق سوخت‌های فسیلی، استخراج معادن، تصفیه سنگ‌های حاوی فلز، دفع کنترل‌شده و نشده پساب‌ها، استفاده از کودهای شیمیایی، آفت‌کش‌ها، حشره‌کش‌ها و مواد رنگی صورت می‌گیرد (Gaur and Adholeya, 2004; Abdullahi *et al.*, 2009). با توجه به اهمیت فلزات سنگین در گیاه می‌توان آنها را به دو دسته تقسیم کرد: ۱- فلزات سنگین ضروری (روی، مس، منگنز، آهن و نیکل) که برای فرایندهای متابولیکی گیاه ضروری‌اند؛ ۲- فلزات سنگین غیرضروری (کادمیوم، سرب و جیوه) (Taiz and Zeiger, 1998; Sebastiani *et al.*, 2004).

سرب از مهم‌ترین فلزات سنگین است که در منابع آب، خاک و هوا پراکنش وسیعی دارد (خداکرمی و همکاران، ۱۳۸۸؛ Yang *et al.*, 2000). وجود معادن متعدد و گسترده سرب و روی در کشور و بهره‌برداری نادرست آنها یکی از منابع مهم گسترش آلودگی این فلزات در خاک است (متشرع‌زاده و همکاران، ۱۳۸۷). خاک آلوده به سرب می‌تواند آسیب‌هایی را به رشد و نمو گیاه وارد سازد (McLaughlin, 2001). حساسیت گیاهان به فلز سنگین سرب متفاوت است (Arriagada *et al.*, 2005); با وجود این، غلظت ۵۰۰-۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب در خاک برای

اغلب گیاهان سمی گزارش شده است (Kabata-Pendias, 2004).

گیاه پالایی^۱ روشی مؤثر، ارزان و سازگار با محیط زیست است (Cunningham and Berti, 2000) که برای حذف، جابه‌جایی یا غیرفعال کردن فلزات یا آلاینده‌های سمی از محیط زیست معرفی شده است (Susarla *et al.*, 2002; Rafati *et al.*, 2011; He *et al.*, 2013). مشکل اصلی فناوری گیاه‌پالایی، مدت زمان به نسبت طولانی این فرایند است. اما در اراضی با کاربری بیشه‌زراعی یا جایی که مقاصد مختلف از جمله، تثبیت اراضی، تولید چوب، سوخت و...، رویش درختان انباشت‌کننده فلزات سنگین مطرح است، این مشکل از اهمیت کمتری برخوردار است (McIntyre, 2003; Rockwood *et al.*, 2004). تحقیقات نشان داده‌اند که درختان تندرشد از قبیل صنوبرها و بیدها، نه تنها به‌دلیل تولید زی‌توده زیاد، سیستم ریشه‌ای عمیق و گسترده و جذب زیاد آب (Bitts'anszky *et al.*, 2009)، بلکه به‌دلیل مقاومت و ظرفیت زیاد انباشت فلزی، گزینه‌های مطلوبی برای گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین به‌شمار می‌آیند (Pulford and Dickinson, 2005; Utmazian *et al.*, 2007).

در فرایند گیاه‌پالایی، مقاومت گیاه به فلز سنگین و استقرار موفقیت‌آمیز آن روی خاک آلوده، عوامل مهم و اساسی برای پالایش زیستی آلاینده توسط گیاه محسوب می‌شوند (Zalesny *et al.*, 2005). یک روش برای ارزیابی مقاومت گیاه به فلز سنگین، بررسی مقدار زنده‌مانی و رشد گیاه در خاک آلوده است (Hunt, 1978; Borghi *et al.*, 2008).

با وجود تأکید تحقیقات متعدد بر اهمیت جنس صنوبر در فرایند گیاه‌پالایی، اطلاعات کمی در مورد پتانسیل گیاه‌پالایی کلون‌های برتر صنوبرهای مورد استفاده در کشور در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین

¹ Phytoremediation

اراضی اطراف معدن سرب و روی عمارت شازند اراک، غلظت سرب خاک ۶۵۰ میلی گرم بر کیلوگرم به دست آمد. از این رو، با توجه به این پیش زمینه در مورد آلودگی خاک با فلز سرب در یک منطقه خشک و نیمه خشک، حداکثر غلظت سرب برای این پژوهش ۱۰۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم لحاظ شد. همچنین در فرایند آلوده کردن خاک، با افزودن مقادیر مناسب کود اوره، مقدار نیترات اضافه شده به خاک تصحیح شد (رحمانیان و همکاران، ۱۳۹۰). گلدان های هفت لیتری با خاک آماده شده پر شدند و سپس تا رطوبت اشباع آبیاری و دو هفته رها شدند تا امکان برهم کنش آلاینده و خاک فراهم و شرایط آلودگی طبیعی تر باشد (خداوردی لو و همایی، ۱۳۸۶).

در اوایل فروردین قلمه ها از سردخانه خارج و ۲۴ ساعت در ظرف پر از آب نگهداری شدند. سپس در هر گلدان یک قلمه (با دو جوانه بالاتر از سطح خاک) کاشته شد. گلدان ها در گلخانه با دمای بین ۱۵ تا ۲۵ درجه سلسیوس به مدت یک دوره رویشی (تا اواخر مهر) نگهداری شدند. آبیاری گلدان ها با آب شیر، ۲-۳ بار در هفته با توجه به نیاز آبی گیاهان به طور کاملاً یکسان برای تمام گلدان ها انجام گرفت. در کل، آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار سطح تیمار سرب در سه تکرار (چهار نهال حاصل از قلمه در هر تکرار) صورت پذیرفت.

در پایان فصل رویش، درصد زنده مانده، رشد ساقه (طول ساقه و قطر یقه ساقه) و نیز تولید زی توده اندام های مختلف نهال ها از طریق اندازه گیری وزن تر و خشک آنها تعیین شد (Borghini et al., 2008). برای اندازه گیری زنده مانده و رشد ساقه، تمام نهال ها بررسی شدند. درصد زنده مانده نهال ها بر اساس رابطه ۱ محاسبه شد.

به ویژه فلز سنگین سرب موجود است. از تحقیقات انجام گرفته در این زمینه می توان به بررسی پتانسیل گیاه پالایی سپیدار یا کبوده (*Populus alba*) در خاک های آلوده به فلزات سنگین (کادمیوم، کروم و نیکل) که توسط علی زاده و همکاران (۱۳۹۰) و Rafati et al. (2011) اشاره کرد. از طرف دیگر، سرب و ترکیبات آن اغلب آلاینده های مهم و رایج، با پتانسیل تجمع زیستی تهدید کننده در گیاهان گزارش شده اند (Cheremisinoff and Habib, 1982). از این رو، در پژوهش حاضر، به ارزیابی پتانسیل گیاه پالایی کلون ۴۴/۹ نهال سپیدار (*Populus alba*) در خاک آلوده به غلظت های مختلف سرب بر حسب زنده مانده، رشد، تولید زی توده و غلظت سرب اندام های مختلف (ریشه، ساقه و برگ) برای استفاده بالقوه از این کلون در سیستم های گیاه پالایی به طور ویژه در نظر گرفته شده است.

مواد و روش ها

در اواخر بهمن از خزانه مؤسسه تحقیقات جنگل ها و مراتع کشور، از کلون ۴۴/۹ سپیدار (*P. alba*) که متداول ترین کلون مورد استفاده در جنگل کاری مناطق خشک و نیمه خشک است (باقری و همکاران، ۱۳۹۱)، قلمه های چهار جوانه ای به طول ۲۲-۱۸ سانتی متر و قطر ۱/۵-۱ سانتی متر تهیه و تا شروع آزمایش در سردخانه (دمای ۴ درجه سلسیوس) نگهداری شد. سپس خاکی با مشخصات ارائه شده در جدول ۱ تهیه و با غلظت های مختلفی از نیترات سرب ($Pb(NO_3)_2$) معادل صفر (شاهد)، ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم آلوده شد. برای تیمار کردن خاک با فلز سنگین سرب از نمک نیترات سرب استفاده شد (Chen et al., 2005؛ Arriagada et al., 2005). از سوی دیگر، با نمونه گیری از خاک

$$۱۰۰ \times (\text{تعداد کل نهال های کاشته شده} / \text{تعداد نهال های زنده مانده}) = \text{درصد زنده مانده}$$

(رابطه ۱)

تعیین شد. در ادامه، برای تعیین وزن خشک و غلظت سرب اندام‌های مختلف نهال به مدت ۴۸ ساعت در دستگاه آون در دمای ۷۰ درجه سلسیوس خشک شدند (Bissonnette *et al.*, 2010). نسبت‌های وزنی ریشه، ساقه و برگ از نسبت زی‌توده اندام مورد نظر به زی‌توده کل نهال و سطح ویژه برگ از نسبت سطح برگ به وزن خشک برگ متناظر محاسبه شد. شاخص مقاومت^۱ (TI) که در واقع معیاری برای سنجش بردباری گیاه به فلز سنگین است، بر اساس وزن خشک ریشه و اندام هوایی طبق رابطه ۲ تعیین شد (Wilkins, 1978; Landberg and Greger, 2002).

(رابطه ۲) $100 \times (\text{وزن خشک گیاه شاهد} / \text{وزن خشک گیاه رش‌دیافته در خاک آلوده}) = \text{TI}$

به حجم ۵۰ میلی‌لیتر رسیدند. در نهایت، غلظت سرب نمونه‌های گیاهی با استفاده از دستگاه جذب اتمی مدل (AA-670) قرائت شد (Pitchel and Bradway, 2008).

فاکتور انتقال^۲ (TF) که در واقع نشان‌دهنده توانایی گیاه در انتقال فلز سنگین به اندام هوایی است، براساس غلظت فلز سنگین در اندام هوایی و ریشه براساس رابطه ۳ محاسبه شد (Zacchini *et al.*, 2009).

(رابطه ۳) $\text{غلظت فلز در ریشه} / \text{غلظت فلز در اندام هوایی} = \text{TF}$

اندازه‌گیری شده (زنده‌مانی، رشد، تولید زی‌توده، شاخص مقاومت، غلظت سرب اندام‌های گیاهی و فاکتور انتقال) از آزمون آنالیز واریانس (ANOVA) و برای گروه‌بندی و مقایسه میانگین‌ها از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد ($P < 0.05$) استفاده شد.

برای تعیین زی‌توده و غلظت سرب اندام‌های مختلف، به‌ازای هر سطح تیمار سرب سه نهال به‌طور تصادفی انتخاب شد. شایان ذکر است که در نهال‌هایی که هر دو جوانه بالای سطح خاک قلمه، دارای رویش شدند، برای طول و قطر یقه، ساقه بلندتر و برای زی‌توده، هر دو ساقه اندازه‌گیری شد. پس از شست‌وشوی نهال، اندام‌های مختلف (ریشه، ساقه و برگ) از هم جدا و وزن تر اندام‌ها اندازه‌گیری شد. تعداد برگ‌های هر نهال شمارش و سطح برگ سه برگ کاملاً توسعه یافته از بالاترین قسمت هر نهال Leaf Area Meter (Yang *et al.*, 2007) با استفاده از

برای تعیین غلظت سرب اندام‌های گیاهی، در ابتدا نمونه‌های خشک گیاهی هضم اسیدی شدند، طوری‌که به ۰/۵ گرم نمونه خشک گیاهی پودر شده، ۶ میلی‌لیتر اسید سولفوریک (H_2SO_4) غلیظ اضافه شد و ۵ دقیقه در دستگاه Digestion (Hach Co., USA) در دمای ۴۴۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. سپس سه میلی‌لیتر آب اکسیژنه (H_2O_2) ۳۰ درصد به آن اضافه شد و سه دقیقه حرارت داده شد. آن‌گاه، نمونه‌ها از کاغذ صافی واتمن ۴۲ عبور داده شدند و با آب مقطر

تجزیه و تحلیل داده‌ها با نرم‌افزار آماری SPSS انجام گرفت. در ابتدا توسط آزمون‌های Shapiro-Wilk و Levene نرمال بودن و همگنی واریانس داده‌ها بررسی شد. سپس برای بررسی تأثیر سطوح مختلف تیمار سرب بر مشخصه‌های

¹ Tolerance Index

² Translocation Factor

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک استفاده‌شده در آزمایش

ویژگی‌های اندازه‌گیری شده	مقدار
رس (درصد)	۱۹/۳
سیلت (درصد)	۳۴/۲
شن (درصد)	۴۶/۵
کلاس بافت	لومی - شنی
pH	۷/۴
قابلیت هدایت الکتریکی (dS/m)	۰/۹۵
ظرفیت تبادل کاتیونی (cmol/kg)	۱۴/۳
کربن آلی (در صد)	۰/۷۵
نیتروژن کل (در صد)	۰/۱۶
فسفر قابل جذب (mg/kg)	۱۰/۸
پتاسیم تبادلی (mg/kg)	۱۰۵
سرب کل (mg/kg)	۲۴/۵۵

نتایج

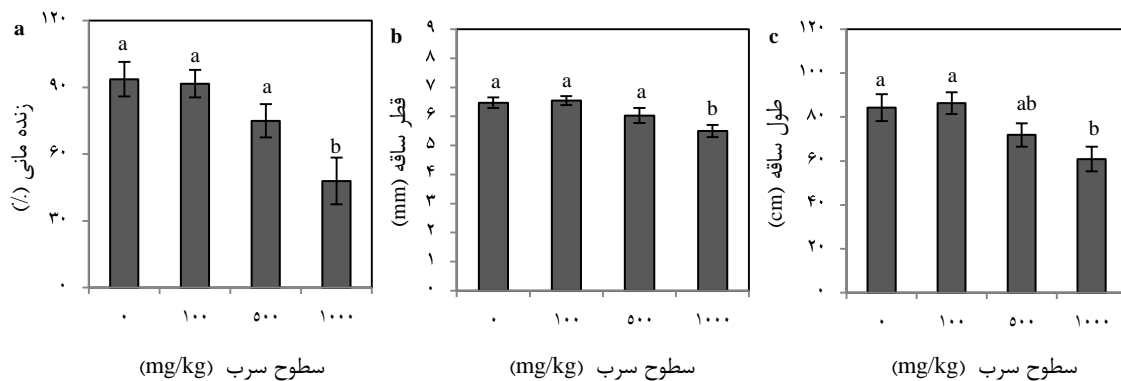
نهال‌های رشدیافته در خاک آلوده به ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب تفاوت‌های معنی‌داری در تخصیص زی‌توده اندام‌های ریشه و برگ نسبت به نهال‌های شاهد نشان دادند، طوری‌که در نسبت وزنی ریشه، کاهش و در نسبت وزنی برگ افزایش معنی‌دار نسبت به مقادیر متناظر نهال‌های شاهد مشاهده شد. با افزایش غلظت سرب در خاک، نسبت ریشه به اندام هوایی نهال‌ها کاهش یافت (جدول ۳).

محاسبه شاخص مقاومت ریشه و اندام هوایی نهال‌ها در سطوح مختلف تیمار سرب نشان داد که کلون مورد آزمایش (۴۴/۹ - *P. alba*)، مقاومت به نسبت خوبی به فلز سنگین سرب دارد، طوری‌که حتی در برابر بیشینه غلظت سرب، اندازه این شاخص در اندام هوایی حداقل ۸۰ درصد و در ریشه حداقل ۴۵ درصد بوده است (جدول ۴، شکل ۲).

با افزایش غلظت فلز سرب خاک، غلظت سرب در اندام ریشه، ساقه و برگ به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (جدول ۴) طوری‌که بیشترین غلظت سرب ریشه، ساقه و برگ در غلظت ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب خاک بود (شکل ۳). در تمام سطوح تیمارهای سرب، بیشترین غلظت سرب به‌ترتیب در اندام ریشه، ساقه و برگ مشاهده شد (شکل ۴).

نتایج نشان داد که تیمار ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب به کاهش زنده‌مانی و رشد نهال‌ها منجر شد، به‌طوری‌که در این غلظت، کاهش ۴۹ درصدی زنده‌مانی و به‌ترتیب کاهش ۱۵ و ۲۸ درصدی رشد قطری و طولی نهال‌ها نسبت به نهال‌های شاهد مشاهده شد. این در حالی است که زنده‌مانی و قطر یقه نهال‌های تیمار شده با ۱۰۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب تفاوتی با نهال‌های شاهد نشان نداد (شکل ۱).

زی‌توده تر و خشک ریشه، ساقه و برگ و زی‌توده کل، در نهال‌های رشدیافته در خاک آلوده به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر فلز سنگین سرب قرار گرفت، به‌طوری‌که زی‌توده کل نهال‌ها در تیمار ۵۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، ۲۱ درصد و در تیمار ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم ۳۶/۵ درصد نسبت به زی‌توده کل نهال‌های شاهد کاهش یافت؛ اما، غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب به کاهش تولید زی‌توده نهال‌ها منجر نشد (جدول ۲). بررسی تعداد برگ، سطح برگ و سطح ویژه برگ نهال‌ها نیز نشان داد که تنها مشخصه تعداد برگ تحت تأثیر تیمار سرب قرار گرفت (جدول ۳).



شکل ۱- زنده‌مانی (a)، قطر ساقه (b) و طول ساقه (c) نهال اسپیدار (*P. alba*) رشدیافته در خاک آلوده به غلظت‌های مختلف سرب (میانگین \pm SE) حروف انگلیسی متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد است.

جدول ۲- زی‌توده ریشه، ساقه و برگ نهال اسپیدار (*P. alba*) رشدیافته در خاک آلوده به غلظت‌های مختلف سرب (میانگین \pm SE)

P-value (ANOVA)	سطوح مختلف سرب (mg/kg)				زی‌توده (g)	اندام
	۱۰۰۰	۵۰۰	۱۰۰	۰		
۰/۰۰۰*	۴/۸۸ \pm ۰/۳۲۶c	۷/۰۸ \pm ۰/۶۳۰b	۱۰/۴۶ \pm ۰/۵۹۶a	۱۱/۸۲ \pm ۰/۴۵۴a	تر	ریشه
۰/۰۰۰*	۲/۵۳ \pm ۰/۴۰۳c	۴/۰۵ \pm ۰/۵۰۴b	۵/۳۷ \pm ۰/۶۲۵a	۶/۰۱ \pm ۰/۳۶۶a	خشک	ریشه
۰/۰۰۰*	۷/۵۸ \pm ۰/۴۹۴b	۹/۰۳ \pm ۰/۳۵۹ab	۱۰/۵۸ \pm ۰/۴۷۲a	۹/۷۵ \pm ۰/۴۳۲a	تر	ساقه
۰/۰۰۰*	۳/۳۷ \pm ۰/۳۶۹b	۴/۱۹ \pm ۰/۲۶۸ab	۵/۳۴ \pm ۰/۵۸۳a	۴/۷۴ \pm ۰/۳۶۶a	خشک	ساقه
۰/۰۰۰*	۹/۴۶ \pm ۰/۷۵۵b	۱۰/۱۱ \pm ۰/۸۵۱b	۱۲/۵۸ \pm ۰/۵۷۰a	۱۲/۰۷ \pm ۰/۶۶۲a	تر	برگ
۰/۰۰۰*	۴/۶۹ \pm ۰/۴۱۵b	۴/۹۸ \pm ۰/۳۱۰b	۶/۲۱ \pm ۰/۳۲۴a	۵/۹۴ \pm ۰/۳۴۶a	خشک	برگ
۰/۰۰۰*	۲۱/۹۴ \pm ۱/۰۴c	۲۶/۲۳ \pm ۱/۲۲b	۳۳/۶۲ \pm ۱/۱۸a	۳۳/۶۵ \pm ۱/۰۹a	تر	زی‌توده کل
۰/۰۰۰*	۱۰/۶۱ \pm ۰/۸۰۲c	۱۳/۲۳ \pm ۰/۷۱۲b	۱۶/۹۴ \pm ۱/۰۴a	۱۶/۷۰ \pm ۰/۷۰۱a	خشک	کل

- حروف انگلیسی متفاوت در هر سطر نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار آماری است؛ * معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد است.

جدول ۳- تعداد برگ، سطح برگ، سطح ویژه برگ و نسبت‌های وزنی ریشه، ساقه و برگ نهال اسپیدار (*P. alba*) رشدیافته در خاک آلوده به غلظت‌های مختلف سرب (میانگین \pm SE)

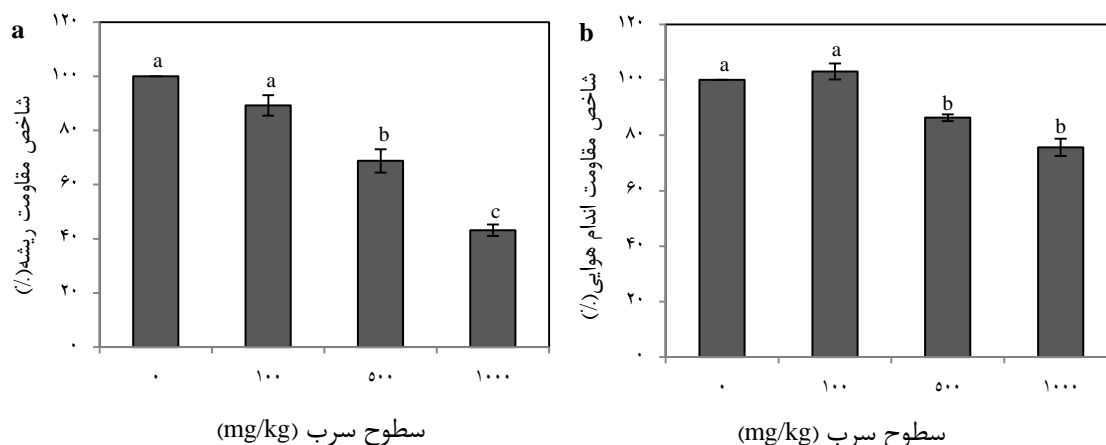
P-value (ANOVA)	سطوح مختلف سرب (mg/kg)				مشخصه
	۱۰۰۰	۵۰۰	۱۰۰	۰	
۰/۰۰۰*	۲۶/۸۳ \pm ۱/۳۶c	۲۹/۵۸ \pm ۰/۸۹b	۳۳/۵۸ \pm ۱/۲۱a	۳۱/۷۵ \pm ۱/۲۲ab	تعداد برگ
۰/۳۶۲ ns	۲۴/۹۴ \pm ۱/۲۹	۲۵/۳۱ \pm ۱/۸۰	۲۶/۱۴ \pm ۲/۲۹	۲۷/۶۸ \pm ۱/۳۶	سطح برگ (cm ²)
۰/۸۲۳ ns	۰/۰۱۴۶ \pm ۰/۰۰۱۴	۰/۰۱۵۲ \pm ۰/۰۰۱۳	۰/۰۱۴۱ \pm ۰/۰۰۱۰	۰/۰۱۴۹ \pm ۰/۰۰۱۱	سطح ویژه برگ (m ² /g)
۰/۰۰۰*	۰/۲۳۹ \pm ۰/۰۳۰b	۰/۳۰۳ \pm ۰/۰۲۳a	۰/۳۱۵ \pm ۰/۰۲۶a	۰/۳۶۰ \pm ۰/۰۱۸a	نسبت وزنی ریشه
۰/۱۳۶ ns	۰/۳۱۶ \pm ۰/۰۲۰	۰/۳۱۷ \pm ۰/۰۱۶	۰/۳۱۴ \pm ۰/۰۲۴	۰/۲۸۳ \pm ۰/۰۱۳	نسبت وزنی ساقه
۰/۰۰۱*	۰/۴۴۴ \pm ۰/۰۲۹a	۰/۳۷۸ \pm ۰/۰۲۴b	۰/۳۷۰ \pm ۰/۰۲۰b	۰/۳۵۶ \pm ۰/۰۱۶b	نسبت وزنی برگ
۰/۰۰۱*	۰/۳۲۲ \pm ۰/۰۲۰c	۰/۴۴۳ \pm ۰/۰۱۶bc	۰/۴۶۷ \pm ۰/۰۱۸ab	۰/۵۶۸ \pm ۰/۰۳۱۳a	نسبت ریشه به اندام هوایی

- حروف انگلیسی متفاوت در هر سطر نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار آماری است؛ ns: نبود اختلاف معنی‌دار؛ * معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد.

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس (ANOVA) تأثیر تیمار سرب بر شاخص مقاومت، غلظت سرب و فاکتور انتقال نهال سپیدار

فاکتور انتقال	غلظت سرب (mg/kg)			شاخص مقاومت		مشخصه
	برگ	ساقه	ریشه	اندام هوایی	ریشه	
۱۴/۱۱	۳۳۶/۸۷	۳۴۴/۶۸	۱۹۰۸/۰۴	۱۷/۱۲	۶۰/۴۷	F
	۰/۰۰۰*	۰/۰۰۰*	۰/۰۰۰*	۰/۰۰۰*	۰/۰۰۰*	P-value

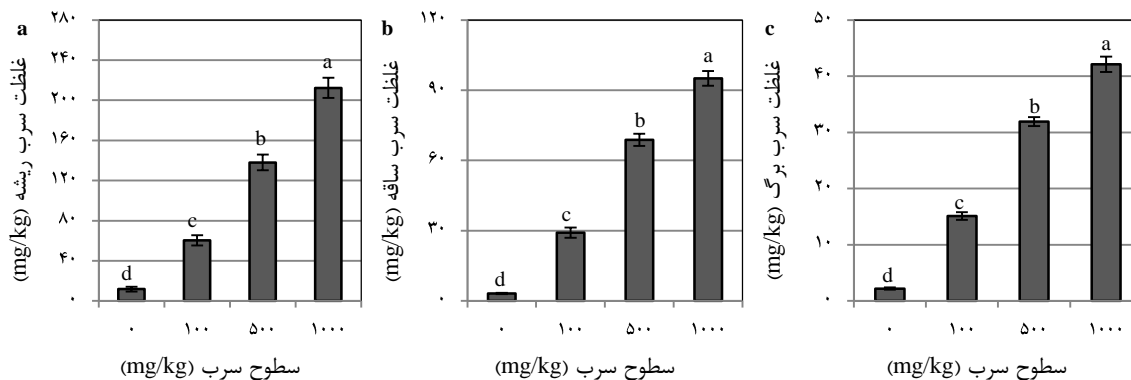
* معنی داری در سطح احتمال ۵ درصد.



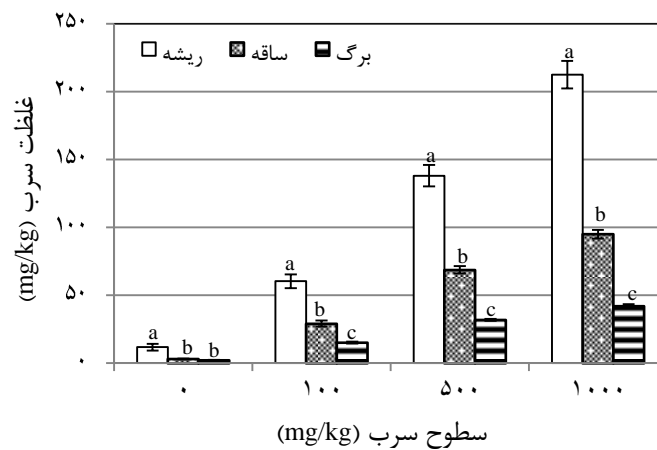
شکل ۲- شاخص مقاومت ریشه (a) و اندام هوایی (b) نهال سپیدار (*P. alba*) رشدیافته در خاک آلوده به غلظت‌های مختلف سرب (میانگین \pm SE) حروف انگلیسی متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد است.

فرقی نکرد، اما همواره بیشتر از آن در نهال شاهد بود (جدول ۴، شکل ۵).

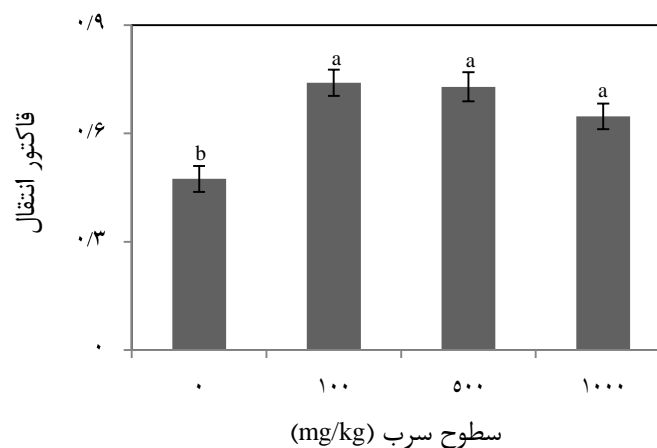
برای توانایی نهال سپیدار در انتقال و تجمع سرب در اندام هوایی، فاکتور انتقال (TF) ارزیابی شد. این مقادیر در سطوح مختلف تیمار سرب به لحاظ آماری



شکل ۳- غلظت سرب ریشه (a)، ساقه (b) و برگ (c) نهال سپیدار (*P. alba*) رشدیافته در خاک آلوده به غلظت‌های مختلف سرب (میانگین \pm SE) حروف انگلیسی متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد است.



شکل ۴- مقایسه غلظت سرب اندام‌های مختلف نهال سپیدار (*P. alba*) رشدیافته در خاک آلوده به غلظت‌های مختلف سرب (میانگین \pm SE) حروف انگلیسی متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد در هر سطح تیمار سرب است.



شکل ۵- فاکتور انتقال یا تجمع سرب در اندام هوایی نهال سپیدار (*P. alba*) رشد یافته در خاک آلوده به غلظت‌های مختلف سرب (میانگین \pm SE) حروف انگلیسی متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد است.

تیمار شده با ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب کمترین زنده‌مانی را داشتند (شکل a-۱). در یافته‌های مطالعات پیشین درصدهای مختلفی از زنده‌مانی صنوبرهای رشدیافته در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین مشاهده شده است. برای مثال زنده‌مانی ۱۰۰ درصد (*P. deltoides* در خاک آلوده به کادمیوم (Cd) (Tanvir and Siddiqui, 2010)، زنده‌مانی ۸۰-۰

بحث

یکی از مشخصه‌های اولیه و مهم ارزیابی کارایی و گیاه در بسترهای آلوده به فلزات سنگین بررسی درصد زنده‌مانی است (Tanvir and Siddiqui, 2010). نتایج این تحقیق در مورد نهال‌های سپیدار در سطوح مختلف تیمار سرب نشان داد که دامنه زنده‌مانی بین ۴۰ تا ۱۰۰ درصد بود، طوری که نهال‌های

مستقیم با مقاومت گیاه به فلز سنگین دارد (Borghgi et al., 2008)، پاسخ‌های رشد گیاهان در بسترهای آلوده به فلزات سنگین متفاوت است. در همین زمینه درجات متفاوتی از رشد و مقاومت گونه‌های مختلف صنوبر در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین گزارش شده است. از جمله، Borghgi et al. (2008) نشان دادند که رشد و مقاومت صنوبر *P. × Canadensis* به فلز مس بیشتر از صنوبر *P. alba* است. Lingua et al. (2008) نیز گزارش کردند که در نهال‌های *P. alba* حضور Zn در خاک، تمام مشخصه‌های رشد را کاهش داد اما روند کاهش در نهال‌های *P. nigra* کمتر بود. همچنین، Gu et al. (2007) نشان دادند که پاسخ‌های رشد چهار گونه صنوبر به غلظت‌های مختلف کادمیوم متفاوت است. به‌طور کلی، پاسخ‌های متفاوت گونه‌ها به خاک‌های آلوده ممکن است متأثر از شرایط متفاوت رویش، ویژگی‌های خاک، سن، وضعیت فیزیولوژیکی گیاه و حساسیت‌های کلونی و گونه‌ای باشد (Lingua et al., 2008).

کاهش رشد و تولید زی‌توده گیاهان در بسترهای آلوده می‌تواند تحت تأثیر عوامل متعددی صورت گیرد. در بررسی (Borghgi et al., 2008)، تداخل در جذب عناصر غذایی مورد نیاز گیاه و فعالیت‌های فنوسنتزی از دلایل کاهش زی‌توده اندام‌های گیاهی گزارش شده است. همچنین شریعت و همکاران (۱۳۸۹) بیان کردند که کاهش رشد شدید نهال‌های اکالیپتوس در حضور یون‌های کادمیوم در خاک، ناشی از اختلال متابولیسم کلی سلول‌ها است. نتایج تحقیق (Toppi and Gabbrielli, 1999) نیز نشان داد که در حضور یون کادمیوم، مقدار پراکسیداسیون چربی‌ها به‌علت افزایش مقدار پراکسید هیدروژن در سلول افزایش می‌یابد که این وضعیت موجب برهم خوردن تعادل آبی و تغذیه‌ای سلول و در نتیجه کاهش وزن گیاه می‌شود. در تحقیق پارسادوست و همکاران (۱۳۸۶) عنوان شد که کاهش سنتز کلروفیل و رشد

درصدی کلون‌های *P. alba* و *P. nigra* رشدیافته در خاک آلوده به مس (Cu) و روی (Zn) (Castiglione et al., 2009; Gamalero et al., 2012) و زنده‌مانی ۲/۵ درصدی گونه‌هایی از جنس صنوبر در خاک آلوده به روی (Schnoor, 2000) گزارش شده است. با توجه به تنوع ژنتیکی گسترده جنس صنوبر (Aravanopoulos et al., 1999)، متغیر بودن نرخ زنده‌مانی کلون‌ها و گونه‌های مختلف این جنس را می‌توان انتظار داشت.

رشد ساقه (رشد قطری و طولی) در نهال‌های سپیدار تیمار شده با ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب به‌طور معنی‌داری نسبت به تیمار شاهد کمتر بود (شکل ۱-b، c). همچنین کاهش معنی‌دار زی‌توده اندام‌های مختلف و زی‌توده کل در نهال‌های تیمار شده با ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب در مقایسه با نهال‌های شاهد مشاهده شد (جدول ۲). طوری که در نهال‌های رشدیافته در خاک آلوده با ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب، زی‌توده خشک برگ، ساقه، ریشه و زی‌توده کل به‌ترتیب ۲۱، ۳۰، ۵۷/۵ و ۳۶/۵ درصد نسبت به مقادیر متناظر نهال‌های شاهد کاهش یافت. در واقع بیشترین (۲۰-۱۵ گرم) و کمترین (۱۲-۸/۵ گرم) مقادیر زی‌توده خشک کل نهال‌ها به‌ترتیب متعلق به تیمار شاهد و تیمار ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب بود. در پژوهشی مشابه روی این گونه با فلز سنگین کادمیوم، زی‌توده اندام‌های مختلف در نهال‌های تحت تنش فلز سنگین کاهش پیدا کرد (Alizadeh et al., 2012).

در پژوهش حاضر، مشخصه‌های سطح برگ و سطح ویژه برگ تحت تأثیر سطوح مختلف تیمار سرب قرار نگرفتند (جدول ۳). در واقع، کاهش رشد و تولید زی‌توده، یکی از پاسخ‌های مهم گیاه به تنش فلز سنگین است (Adriaensen et al., 2003; Taka'cs et al., 2005; Gu et al., 2007). اما از آنجا که رشد و تولید زی‌توده گیاه در خاک آلوده ارتباط

روی *S. matsudana*، *S. nigra*، *Salix alba* و *S. viminalis* (Bissonnette et al., 2010) و نیز گزارش شده است. *Populus × generosa* نیز گزارش شده است. (Pulford and Dickinson, 2005) بیان کردند که سرب نسبت به دیگر فلزات سنگین بیشتر در ریشه گیاه تجمع پیدا می‌کند. در واقع، تثبیت و تجمع فلز سنگین در ریشه و ممانعت انتقال آن به اندام هوایی که ممکن است به دلیل سکوستره شدن آلاینده فلزی در واکنش‌ها و سلول‌های ریشه باشد، از سازوکارهایی است که برخی گیاهان برای مقابله با سمیت فلزات سنگین به کار می‌برند، زیرا بدین وسیله اندام‌هایی که در متابولیسم گیاه نقش دارند از آسیب فلز سنگین حفظ می‌شوند (کمال‌پور و همکاران، ۱۳۹۲؛ Sankar Ganesh et al., 2006).

در تحقیق حاضر، در تمام سطوح تیمار سرب، غلظت سرب ساقه بیشتر از برگ بود (شکل ۴). بر پایه این نتایج، (Arriagada et al., 2005) با بررسی نهال *Eucalyptus globulus* رشدیافته در خاک آلوده به سرب و (Mrnka et al., 2012) با بررسی نهال‌های *S. alba* و *P. nigra* رشدیافته در خاک آلوده به فلزات سنگین (اغلب کادمیوم، سرب و روی) دریافتند که تجمع سرب در اندام ساقه بیشتر از برگ بود. به‌طور کلی، تجمع بیشتر فلز سنگین در ساقه نسبت به برگ از دو نظر حائز اهمیت است: ۱) تجمع فلز سنگین در اندامی از گیاه است که از نظر متابولیسم و سوخت‌وساز از اهمیت کمتری برخوردار است؛ در نتیجه آسیب وارد شده به مشخصه‌های فیزیولوژی گیاه کمتر خواهد بود (Leep and Dickinson, 1998)؛ ۲) از طرف دیگر تجمع فلز سنگین در ساقه در فرایند استخراج گیاهی از اهمیت زیادی برخوردار است (Arriagada et al., 2005).

از آنجاکه گیاه بیش‌انباشته‌گر سرب گیاهی است که توانایی تجمع بیش از ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب در اندام هوایی خود را دارد (Yanqun et al., 2004)، با توجه به غلظت سرب در اندام هوایی، کلون مورد

گیاه ناشی از سمیت سرب در خاک به این دلیل است که سرب بسیاری از جنبه‌های رفتار متابولیسمی کلسیم را تقلید کرده و در نتیجه از فعالیت بسیاری از آنزیم‌ها جلوگیری می‌کند.

در مباحث گیاه‌پالایی، شاخص مقاومت گیاه (TI) یکی از عوامل مهم بررسی گیاه در بستر آلوده به فلز سنگین است (Umebese and Motajo, 2008). (Landberg and Greger, 2002) شاخص مقاومت را برای کلون‌های حساس به فلز سنگین (مثل *Salix viminalis*)، ۳۰-۱۵ درصد و برای کلون‌های مقاوم به فلز سنگین، ۸۵-۷۰ درصد گزارش کردند. در بررسی (Borghi et al., 2008) نیز برای مقاومت شایان توجه صنوبر *P. × canadensis* به فلز مس، TI اندام هوایی و ریشه به‌ترتیب ۹۳ و ۷۷/۲ درصد، و برای مقاومت *P. alba* به مس، TI اندام هوایی و ریشه به‌ترتیب، ۴۲/۷ و ۲۶/۳ درصد گزارش شد. بنابراین، با توجه به شاخص‌های مقاومت به‌دست‌آمده در این پژوهش (شکل ۲) برای کلون ۴۴/۹ اسپیدار (*P. alba*) نسبت به سرب (TI اندام هوایی حداقل ۸۰ درصد و TI ریشه حداقل ۴۵ درصد)، می‌توان گفت این کلون دارای مقاومت به‌نسبت خوبی حتی در برابر بیشینه غلظت فلز سنگین سرب است.

غلظت سرب ریشه، ساقه و برگ در نهال‌های رشدیافته در خاک آلوده به‌طور معنی‌داری نسبت به نهال‌های شاهد افزایش یافت، طوری که بیشترین غلظت سرب ریشه، ساقه و برگ در غلظت ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب خاک مشاهده شد (شکل ۳). از طرف دیگر، بیشترین غلظت سرب در ریشه بود (شکل ۴)، طوری که غلظت سرب ریشه ۲/۲ و ۵ برابر غلظت سرب ساقه و برگ بود.

تجمع بیشتر سرب در ریشه نسبت به اندام‌های دیگر در مطالعات کمال‌پور و همکاران (۱۳۹۲) روی *Eucalyptus camaldulensis* (Baum et al., 2006) و روی *Salix × dasyclados* (Borišev et al., 2009)

منابع

باقری، رضا، رفعت‌اله قاسمی، محسن کلاگری و فرشید مریخ، ۱۳۹۱. بررسی تاثیر دوره‌های مختلف آبیاری در عملکرد ارقام برتر صنوبر، تحقیقات جنگل و صنوبر ایران، ۲۰: ۳۵۷-۳۶۹.

پارسادوست، فرزاد، بابک بحرینی‌نژاد، علی اکبر صفری سنجانی و محمدمهدی کابلی، ۱۳۸۶. گیاه‌پالایی عنصر سرب توسط گیاهان مرتعی و بومی در خاک‌های آلوده منطقه ایران کوه (اصفهان)، پژوهش و سازندگی، ۷۵: ۵۴-۶۳.

خداکرمی، یحیی، انوشیروان شیروانی، قوام‌الدین زاهدی امیری، محمد متینی‌زاده و هوشمند صفری، ۱۳۸۸. مقایسه مقدار جذب فلز سرب در اندام‌های مختلف (ریشه، ساقه و برگ) نهال‌های یک‌ساله دو گونه بلوط ایرانی (*Quercus brantii*) و بنه (*Pistacia atlantica*) به روش محلول پاشی، مجله جنگل ایران، ۴: ۳۱۳-۳۲۰.

خداوردی‌لو، حبیب و مهدی همایی، ۱۳۸۶. مدل‌سازی پالایش سبز کادمیوم و سرب از خاک‌های آلوده با استفاده از توابع کاهش تعرق گیاه، آبیاری و زهکشی ایران، ۱: ۱۶-۷.

رحمانیان، محمد، حبیب خداوردی‌لو، میرحسن رسولی صدقیانی، یونس رضایی دانش و محسن برین، ۱۳۹۰. پیامد مایه زنی خاک با ریزجانداران بردبار به فلزهای سنگین بر رشد گیاه و جذب سرب و کادمیم در سه گیاه مرتعی، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، ۱۵(۵۸): ۱۹۷-۱۸۷.

شریعت، آناهیتا، محمدحسن عصاره و عباس قمری زارع، ۱۳۸۹. اثر کادمیوم بر برخی پارامترهای فیزیولوژی *Eucalyptus occidentalis* در فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، ۵۳: ۱۴۵-۱۵۳.

علی‌زاده، سید مهدی، قوام‌الدین زاهدی امیری، غلام‌رضا ثواقبی فیروزآبادی، وحید اعتماد، انوشیروان شیروانی، مصطفی شیرمردی، ۱۳۹۰. تاثیر بهبود شرایط خاک بر پاسخ‌های انباشت فلز کادمیوم در نهال‌های یک ساله صنوبر (*Populus alba* L.)، مجله جنگل ایران، ۴: ۳۵۵-۳۶۶.

بررسی سپیدار را نمی‌توان جزء گیاهان بیش‌انباشته‌گر سرب محسوب کرد. با این حال، با توجه به اینکه غلظت فلز سنگین سرب به‌طور معمول در اندام هوایی گیاهان ۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم است (Yanqun et al., 2004)، نهال‌های *P. alba* در غلظت ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب توانستند حدود ۱۳۷/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب را که ۲۷/۵ برابر مقدار معمولی در گیاهان است، در اندام هوایی (ساقه و برگ) خود ذخیره کنند. البته، در فرایند استخراج گیاهی علاوه بر گیاهان بیش‌انباشته‌گر، گیاهان غیر بیش‌انباشته‌گر ولی با تولید زی‌توده زیاد و مقاوم به فلزات سنگین نیز می‌توانند مورد توجه باشند (کمال‌پور و همکاران، ۱۳۹۲؛ Fischerova et al., 2006).

در کل، با توجه به نتایج تحقیق پیش رو می‌توان اظهار داشت که، نظر به رویش مطلوب، زنده‌مانی قابل قبول و شاخص مقاومت به‌نسبت خوب همراه با بهبود تجمع سرب در اندام هوایی کلون ۴۴/۹ *P. alba* رشدیافته در خاک آلوده به سرب، این کلون توانایی پالایش خاک آلوده به سرب (تا غلظت ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) را دارد. از این رو، در تحقیقات آتی گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به سرب به‌ویژه در آزمایش‌های عرصه با غلظت‌های بیشتر سرب، این کلون به عنوان یک گونه پیشنهادی می‌تواند مورد توجه محققان قرار گیرد. شایان ذکر است که گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده روشی مفید و با مزایای خاص است. لیکن، از یک سو، این روش زودودن آلودگی خاک، فرآیندی تدریجی است و به کشت گیاهان در طی سالیان زیاد نیاز دارد. از سوی دیگر، خاک‌های آلوده، بوم‌سازگان پیچیده‌ای‌اند که پیش‌بینی‌های کلی برای اصلاح آنها دشوار است، طوری که دیگر فاکتورها، مانند شرایط محیطی، اجزای خاک و جامعه میکروبی خاک که به‌طور مثبت یا منفی می‌توانند فرایند گیاه‌پالایی را تحت تأثیر قرار دهند، نیز باید بررسی شوند.

- Bitts'anszky, A., G. Gyulai, G. Gullner, J. Kiss, Z. Szab'ó, G. K'atay, L. Heszky and T. K'om'ives, 2009. In vitro breeding of grey poplar (*Populus × canescens*) for phytoremediation purposes, *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 84: 890-894.
- Bojarczuk, K., and B. Kieliszewska-Rokicka, 2010. Effect of ectomycorrhiza on Cu and Pb accumulation in leaves and roots of silver birch (*Betula pendula* Roth.) seedlings grown in metal-contaminated soil, *Water, Air, and Soil Pollution*, 207: 227-240.
- Borghi, M., R. Tognetti, G. Monteforti, and L. Sebastiani, 2008. Responses of two poplar species (*Populus alba* and *Populus × canadensis*) to high copper concentrations, *Environmental and Experimental Botany*, 62: 290-299.
- Borišev, M., S. Pajević, N. Nikolić, A. Pilipović, B. Krstić, and S. Orlović, 2009. Phytoextraction of Cd, Ni, and Pb using four willow clones (*Salix* spp.), *Polish Journal of Environmental Studies*, 18: 553-561.
- Castiglione, S., V. Todeschini, C. Franchin, P. Torrigiani, D. Gastaldi, A. Cicatelli, C. Rinaudo, G. Berta, S. Biondi, and G. Lingua, 2009. Clonal differences in survival capacity, copper and zinc accumulation, and correlation with leaf polyamine levels in poplar: A large-scale field trial on heavily polluted soil, *Environmental Pollution*, 157: 2108-2117.
- Chen, X., C. Wu, J. Tang, and S. Hu, 2005. Arbuscular mycorrhizae enhance metal lead uptake and growth of host plants under a sand culture experiment, *Chemosphere*, 60: 665-671.
- Cheremisinoff, P.N., and Y.H. Habib, 1982. Cadmium, lead, mercury: a plenary account for water pollution, occurrence, toxicity and detection, *Water and Sewage Works*, 119: 73-83.
- Cunningham, S.D., and W.R. Berti, 2000. 'Phytoextraction and Phytostabilization: Technical, Economic, and regulatory considerations of the soil-lead issue', in N. Terry and G. Bañuelos (Eds.). *Phytoremediation of Contaminated Soils and Water*, CRC Press, Boca raton, FL, USA, pp. 359-376.
- کمال‌پور، سما، بابک متشروع‌زاده، حسینعلی علیخانی و مهدی زارعی، ۱۳۹۲. بررسی تاثیر برخی عوامل زیستی بر گیاه‌پالایی سرب و جذب فسفر توسط اکالیپتوس (*Eucalyptus camaldulensis*)، مجله جنگل ایران، ۴: ۴۷۰-۴۵۷.
- متشروع‌زاده، بابک، غلامرضا ثواقبی فیروز آبادی، حسینعلی علیخانی و حسین میرسیدحسینی، ۱۳۸۷. شناسایی گیاهان بومی و باکتری‌های مقاوم به فلزات سنگین در اراضی اطراف معدن سرب و روی عمارت شازند اراک به‌منظور استفاده در گیاه‌پالایی، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۱: ۱۶۳-۱۷۴.
- Abdullahi, M.S., A. Uzairu, and O.J. Okunola, 2009. Quantitative determination of heavy metal concentration in onion leaves, *International Journal of Environmental Research*, 3: 271-274.
- Adriaensen, K., D. Van der Lelie, A. Van Laere, J. Vangronsveld, and J.V. Colpaert, 2003. A zinc-adapted fungus protects pines from zinc stress, *New Phytologist*, 161: 549-555.
- Alizadeh, S.M., G. Zahedi-Amiri, G. Savaghebi-Firoozabadi, V. Etemad, A. Shirvany, and M. Shirmardi, 2012. Assisted phytoremediation of Cd-contaminated soil using poplar rooted cuttings, *International Agrophysics*, 26: 219-224.
- Aravanopoulos, F.A., K.H. Kim, and L. Zsuffa, 1999. Genetic diversity of superior *Salix* clones selected for intensive forestry plantations, *Biomass Bioenergy*, 16: 249-255.
- Arriagada, C.A., M.A. Herrera, and J.A. Ocampo, 2005. Contribution of arbuscularmycorrhizal and saprobe fungi to the tolerance of *Eucalyptus globulus* to Pb, *Water, Air, and Soil Pollution*, 166: 31-47.
- Baum, C., K. Hryniewicz, P. Leinweber, and R. Meissner, 2006. Heavy-metal mobilization and uptake by mycorrhizal and nonmycorrhizal willows (*Salix × dasyclados*). *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 169: 516-522.
- Bissonnette, L., M. St-Arnaud, and M. Labrecque, 2010. Phytoextraction of heavy metals by two Salicaceae clones in symbiosis with arbuscularmycorrhizal fungi during the second year of a field trial, *Plant and Soil*, 332: 55-67.

- Fischerova, Z., P. Tlustos, J. Szakova, and K. Sichorova, 2006. A comparison of phytoremediation capability of selected plant species for given trace elements, *Environmental Pollution*, 144: 93-100.
- Gamalero, E., P. Cesaro, A. Cicatelli, V. Todeschini, C. Musso, S. Castiglione, A. Fabiani, and G. Lingua, 2012. Poplar clones of different sizes, grown on a heavy metal-polluted site, are associated with microbial populations of varying composition, *Science of the Total Environment*, 425: 262-270.
- Gaur, A., and A. Adholeya, 2004. Prospects of arbuscularmycorrhizal fungi in phytoremediation of heavy metal-contaminated soils, *Current Science*, 86: 528-534.
- Gu, J., L. Qi, W. Jiang, and D. Liu, 2007. Cadmium accumulation and its effects on growth and gas exchange in four *Populus* cultivars, *Acta Biologica Cracoviensia Series Botanica*, 49: 7-14.
- He, J., C. Ma, Y. Ma, H. Li, J. Kang, T. Liu, A. Polle, C. Peng, and Z. Luo, 2013. Cadmium tolerance in six poplar species, *Environmental Science and Pollution Research*, 20: 163-174.
- Hunt, R. 1978. Plant Growth Analysis. Camelot Press Ltd., Southampton, UK.
- Kabata-Pendias, A. 2004. Soil-plant transfer of trace elements-an environmental issue, *Geoderma*, 122: 143-149.
- Landberg, T., and M. Greger, 2002. Differences in oxidative stress in heavy metal resistant and sensitive clones of *Salix viminalis*, *Journal of Plant Physiology*, 159: 69-75.
- Leep, N.W., and N.M. Dickinson, 1998. 'Biological Interactions: The role of woody plants in phytoremediation', in J. Vangronsveld and S. Cunningham (eds.), *Metal Contaminated Soils. In situ Inactivation and Phytoremediation*, Springer Verlag, Berlin, pp. 67-73.
- Lingua, G., C. Franchin, V. Todeschini, S. Castiglione, S. Biondi, B. Burlando, V. Parravicini, P. Torrigiani, and G. Berta, 2008. Arbuscularmycorrhizal fungi differentially affect the response to high zinc concentrations of two registered poplar clones, *Environmental Pollution*, 153: 137-147.
- McIntyre, T. 2003. Phytoremediation of heavy metals from soils, *Advances in Biochemistry Engineering Biotechnology*, 78: 97-123.
- McLaughlin, M.J. 2001. Bioavailability of metals to terrestrial plants', in H. E. Allen (ed.), *Bioavailability of Metals in Terrestrial Ecosystems. Importance of Partitioning for Bioavailability to Invertebrates, Microbes and Plants*, SETAC Press, Pensacola, FL, pp. 39-68
- Mrnka, L., M. Kuchár, Z. Cieslarová, P. Matějka, J. Száková, P. Tlustoš, and M. Vosátka, 2012. Effects of endo- and ectomycorrhizal fungi on physiological parameters and heavy metals accumulation of two species from the family salicaceae, *Water, Air, and Soil Pollution*, 223: 399-410.
- Pitchel, J., and D.J. Bradway, 2008. Conventional crops and organic amendments for Pb, Cd and Zn treatment at a severely contaminated site, *Bioresource Technology*, 99: 1242-1251.
- Pulford, I.D., and N.M. Dickinson, 2005. Phytoremediation technologies using trees. In: Prasad MNV, Naidu R [eds.], *Trace elements in the environment*, 375-395. CRC Press, New York.
- Rafati, M., N. Khorasani, F. Moattar, A. Shirvany, F. Moraghebi, and S. Hosseinzadeh, 2011. Phytoremediation potential of *Populus alba* and *Morus alba* for cadmium, chromium and nickel absorption from polluted soil, *International Journal of Environmental Research*, 5: 961-970.
- Rockwood, D.L., C.V. Naidu, D.R. Carter, M. Rahmani, T.A. Spriggs, C. Lin, G.R. Alker, J.G. Isebrands, and S.A. Segrest, 2004. Short-rotation wood crops and phytoremediation: opportunities for agroforestry, *Agroforestry Systems*, 6: 51-63.
- Sankar Ganesh, K., P. Sundaramoorthy, and A.L.A. Chidambaram, 2006. Chromium toxicity effect on blackgram, soybean and paddy, *Pollution Research*, 25: 257-261.
- Schnoor, J.L. 2000. Phytostabilization of metals using hybrid poplar trees. In: Raskin, I., Ensley, B.D. (Eds.), *Phytoremediation of Toxic Metals. Using Plants to Clean Up the Environment*. John Wiley and Sons, New York, pp. 133-150

- Sebastiani, L., F. Scebba, and R. Tognetti, 2004. Heavy metal accumulation and growth responses in poplar clones Eridano (*Populus deltoides* × *maximowiczii*) and I-214 (*P. × euramericana*) exposed to industrial waste, *Environmental and Experimental Botany*, 52: 79-88.
- Susarla, S., V.F. Medina, and S.C. McCutcheon, 2002. Phytoremediation: An ecological solution to organic chemical contamination, *Ecological Engineering*, 18: 647-658.
- Taiz, L., and E. Zeiger, 1998. Mineral nutrition. In: Taiz, L., Zeiger, E. (Eds.), *Plant Physiology*. Sinauer Associates Inc., Sunderland, pp. 103-124.
- Taka`cs, T., L. Radimsky and T. Ne`meth, 2005. The arbuscularmycorrhizal status of poplar clones selected for phytoremediation of soils contaminated with heavy metals, *Zeitschrift fuer Natur forschung Section C Journal of Biosciences*, 60: 357-361.
- Tanvir, M.A., and M.T. Siddiqui, 2010. Growth performance and cadmium (Cd) uptake by *Populus deltoides* as irrigated by urban wastewater, *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 47: 235-240.
- Toppi, S.d.L. and R. Gabbrielli, 1999. Response to cadmium in higher plants-review, *Environmental and Experimental Botany*, 41: 105-130.
- Torresday, J.L., J.R.P. Videa, G.D. Rosa, and J. Parsons, 2005. Phytoremediation of heavy metals and study of the metal coordination by x-ray absorption spectroscopy, *Coordination Chemistry Reviews*, 249: 1797-1810.
- Umebese, C.E., and A.F. Motajo, 2008. Accumulation, tolerance and impact of aluminium, copper and zinc on growth and nitrate reductase activity of *Ceratophyllum demersum* (Hornwort), *Journal of Environmental Biology*, 29: 197-200.
- Utmazian, M.N.D., G. Wieshammer, R. Vega, and W.W. Wenzel, 2007. Hydroponic screening for metal resistance and accumulation of cadmium and zinc in twenty clones of willows and poplars, *Environmental Pollution*, 148: 155-165.
- Wilkins, D.A. 1978. The measurement of tolerance to edaphic factors by means of root growth, *New Phytologist*, 80: 623-633.
- Yang, Y., Q. Liu, C. Han, Y.Z. Qiao, X.Q. Yao, and H.J. Yin, 2007. Influence of water stress and low irradiance on morphological and physiological characteristics of *Picea asperata* seedlings, *Photosynthetica*, 45: 613-619.
- Yang, Y.Y., J.Y. Jung, W.Y. Song, H.S. Suh, and Y. Lee, 2000. Identification of rice varieties with high tolerance or sensitivity to Lead and characterization of the mechanism of tolerance, *Plant Physiology*, 124: 1019-1026.
- Yanqun, Z., L. Yuan, C. Schvartz, L. Langlade, and L. Fan, 2004. Accumulation of Pb, Cd, Cu and Zn in plants and hyperaccumulator choice in Lanping lead-zinc mine area, China, *Environment International*, 30: 567-576.
- Zacchini, M., F. Pietrini, G.S. Mugnozza, V. Iori, L. Pietrosanti, and A. Massacci, 2009. Metal tolerance, accumulation and translocation in poplar and willow clones treated with cadmium in hydroponics, *Water, Air, and Soil Pollution*, 197: 23-34.
- Zalesny Jr. R.S., E.O. Bauer, R.B. Hall, J.A. Zalesny, J. Kunzman, C.J. Rog, and D.E. Riemenschneider, 2005. Clonal variation in survival and growth of hybrid poplar and willow in an in situ trial on soils heavily contaminated with petroleum hydrocarbons, *International Journal of Phytoremediation*, 7: 177-197.

Survival, growth and Pb concentration of *Populus alba* (clone 44/9) seedling in Pb-contaminated soil

A. Salehi¹, M. Tabari^{2*}, and A. Shirvani³

¹ Ph.D. Graduated, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, I. R. Iran.

² Prof., Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, I. R. Iran.

³ Assistant Prof., Faculty of Natural Resources, University of Tehran, I. R. Iran.

(Received: 18 February 2014, Accepted: 20 September 2014)

Abstract

Phytoremediation potential of *Populus alba* clone 44/9 to Pb-contaminated soil (concentrations of 0, 100, 500, 1000 mg Pb kg⁻¹ soil) was investigated in greenhouse as completely randomized design. The results indicated that at the end of growing season, in the soil polluted with 1000 mg Pb kg⁻¹, survival, stem length and stem collar diameter, and in the soil polluted with 500 and 1000 mg Pb kg⁻¹, root/shoot ratio, biomass of organs (root, stem and leaf) and total biomass were significantly decreased in comparison with control. With increasing the Pb concentration of soil, Pb concentration of plant organs also increased whereas the highest Pb concentration of root, stem and leaf (212.38, 95.03 and 42.1, respectively) was observed in 1000 mg Pb kg⁻¹. In all Pb concentrations the greatest and the lowest values allocated to root and leaf, respectively. Translocation factor increased in Pb-polluted soils (compared with control) and the greatest value (0.74 and 0.72) was observed in 100 and 500 mg Pb kg⁻¹. Tolerance indices of shoot (min. 80%) and root (min. 45%) revealed that this clone has a relatively good tolerance even to maximum concentration of Pb heavy metal (1000 mg kg⁻¹). Regarding to satisfactory survival, desirable growth, relatively good tolerance index and suitable Pb accumulation in seedling organs, it is concluded that this clone has a high phytoremediation potential to Pb-contaminated soil (till 1000 mg Pb kg⁻¹). So, in further investigations for phytoremediation of Pb-contaminated soils (especially in field trials and with higher Pb concentration) this clone can be considered by researchers.

Keywords: Lead (Pb), Phytoremediation, *Populus alba*, Soil pollution, Tolerance index.

* Corresponding author

Tel: +9112246250

E-mail: mtabari@modares.ac.ir