Archive of SID

فصلنامه علمی – پژوهشی تحقیقات جنگل و صنوبر ایران
جلد ۲۴ شماره ۳، صفحه ۵۰۶-۴۹۶، (۱۳۹۵)

تحمل صنوبر اورامریکن (*Populus euramericana* 561/41) به غلظت‌های مختلف سرب

عاطفه‌سادات امامی [۱]، مسعود طبری کوچکسرایی [۲*]، نادر بهرامی‌فر [۳] و آزاده صالحی [۴]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد جنگل‌داری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

۲*- نویسنده مسئول، استاد، گروه جنگل‌داری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

پست الکترونیک: mtabari@modares.ac.ir

۳- استادیار، گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

۴- استادیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۵/۲۷ تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۰/۲۹

چکیده

در پژوهش پیش‌رو، پتانسیل گیاه‌پالایی کلن ۵۶۱/۴۱ صنوبر اورامریکن (*Populus euramericana* Guinier) به خاک آلوده به سرب (غلظت‌های صفر، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در یک مکان مسقف در قالب طرح کامل تصادفی بررسی شد. نتایج نشان داد که در غلظت‌های ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب، زنده‌مانی به‌ترتیب حدود ۱۹/۹، ۳۵/۸، ۵۵/۶ و ۶۰/۳ درصد کاهش یافت. این درحالی بود که اعمال غلظت‌های مختلف سرب تغییر محسوسی در کاهش طول ریشه و ارتفاع ساقه ایجاد نکرد و تا غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب، سطح برگ و زی‌توده‌های ریشه، ساقه، برگ و کل نونهال کاهش پیدا نکرد. با افزایش غلظت سرب در خاک، غلظت و مقدار سرب در ریشه، ساقه و برگ افزایش یافت و مقادیر آنها همواره در ریشه بیشتر از ساقه و برگ بود. در غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب، کارآیی انتقال (تجمع سرب در اندام هوایی) و شاخص‌های تحمل ریشه، اندام هوایی و نونهال بیشتر از غلظت‌های دیگر اعمال‌شده سرب بود. به‌طور کلی، نونهال‌های *P. euramericana* در غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم تحمل بسیار خوبی نسبت به فلز سنگین سرب داشتند و در غلظت‌های بیشتر، اگرچه شاخص تحمل آنها حدود ۶۰ درصد کاهش یافت، اما نشان‌دهنده تحمل قابل قبول این کلن در غلظت‌های زیاد سرب بود. همچنین انباشت قابل ملاحظه سرب در ریشه، نشان‌دهنده عمل تثبیت ریشه‌ای بود که می‌تواند این کلن را برای پروژه‌های گیاه‌پالایی در محیط‌های آلوده به سرب، مطلوب معرفی کند.

واژه‌های کلیدی: آلودگی خاک، سرب، شاخص انتقال، شاخص تحمل، گیاه‌پالایی.

مقدمه

خاک به‌عنوان یکی از اجزای محیط زیست، مهمترین دریافت‌کننده پسماندهای صنعتی و کشاورزی است و آلودگی خاک با فلزات سنگین یکی از اساسی‌ترین مشکلات محیط زیستی (با توجه به سمی بودن و پایداری درازمدت آنها در خاک) است (Salazar & Pignata, 2014). فلزات سنگین گروهی از عناصر با وزن مخصوص بیشتر از پنج گرم بر سانتی‌متر مکعب هستند (Toppi & Gabbrielli, 1999). در بین فلزات سنگین، سرب (Pb) به‌دلیل پایداری در خاک و ایجاد سمیت زیاد در موجودات، یکی از

www.SID.ir

Archive of SID

تهدیدآمیزترین آلاینده‌های محیط زیست به‌شمار می‌رود (Han *et al.*, 2013). آلودگی آب و خاک با فلز سرب منجر به تغییر ساختار، پویایی و تنوع پوشش گیاهی می‌شود و بر رشد گونه‌های حساس تأثیرگذار است (Han *et al.*, 2013). حساسیت گیاهان به فلز سنگین سرب متفاوت است، با این‌وجود، غلظت ۱۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم Pb خاک برای اغلب گیاهان، سمی گزارش شده است (Kabata-Pendias, 2004).

وجود معادن متعدد و گسترده سرب و روی در کشور و بهره‌برداری نادرست آنها از عامل‌های مهم گسترش آلودگی این فلزات در خاک است (Motesharezade *et al.*, 2008). از این‌رو ضروری است که زمینه کاهش این فلزات مضر از عرصه‌های طبیعی و محیط زیست براساس تکنیک‌های گیاه‌پالایی فراهم شود. گیاه‌پالایی که یک روش زیستی برای اصلاح خاک‌های آلوده به فلزات سنگین است، از گیاهان برای کاهش، حذف، تجزیه و ساکن‌سازی آلاینده‌ها به‌ویژه آلاینده‌های انسان‌ساخت استفاده می‌کند (He *et al.*, 2013). در سال‌های اخیر این روش به‌دلیل داشتن هزینه کمتر، سازگار بودن با محیط زیست، حفظ حاصلخیزی خاک و حفظ زیبایی، حداقل تخریب، هماهنگی با طبیعت و استفاده در مقیاس وسیع، کانون توجه مدیران و پژوهشگران بوده است (Alizadeh *et al.*, 2012). با این‌حال مشکل اصلی فناوری گیاه‌پالایی، مدت زمان طولانی برای انجام این فرآیند است. این مسأله می‌تواند در اراضی با اهداف زراعت چوب، تولید چوب سوخت، تثبیت اراضی و غیره با کاشت درختانی با توانایی زیاد گیاه‌پالایی خاک کاهش یابد. فناوری گیاه‌پالایی نسبت به روش‌های فیزیکی- شیمیایی پالایش خاک آلوده، مزایای بیشتری دارد (Kramer, 2005) و زمانی‌که گیاهان مورد استفاده، بومی و غیرمهاجم باشند، این مزایا بیشتر می‌شود (Salazar & Pignata, 2014).

به‌طور کلی، روش‌های استخراج گیاهی (Phytoextraction) و تثبیت گیاهی (Phytostabilization) برای پالایش خاک‌های آلوده به فلزات سنگین به‌کار می‌رود. در استخراج گیاهی، فلزات سنگین از خاک به اندام‌های هوایی (ساقه و برگ) انتقال می‌یابند. در مقابل، در تثبیت گیاهی، از گیاهان برای کاهش تحرک فلزات سنگین در خاک و تثبیت آنها در ناحیه ریشه استفاده می‌شود (Kvesitadze *et al.*, 2006). در میان گونه‌های مختلف درختی، صنوبرها و بیدها با توجه به رشد سریع، سازگاری، سیستم ریشه‌ای توسعه‌یافته، جذب زیاد آب و تعرق، اغلب در فرآیند گیاه‌پالایی استفاده می‌شوند (Pulford & Dickinson, 2005). صنوبرها جزء گیاهان بیش‌انباشته‌گر (Hyper accumulation) نیستند، اما زی‌توده به‌نسبت زیادی تولید می‌کنند، به‌طوری‌که به‌صورت نسبی مقدار زیادی فلز سنگین می‌تواند از هر گیاه صنوبر استخراج شود (Kovačević *et al.*, 2013).

مطالعات گوناگون در مورد واکنش کلن‌های مختلف صنوبر نسبت به Pb و میزان جذب و تجمع آن در اندام‌های مختلف انجام شده است. به‌طور مثال Malá و همکاران (۲۰۰۷) با بررسی قابلیت جذب Pb از یک محیط هیدروپونیک توسط صنوبر هیبرید *P. tremula* × *P. tremuloides* و Hu و همکاران (۲۰۱۳) با ارزیابی توانایی گیاه‌پالایی *P. alba* در خاک آهکی آلوده به سرب، تجمع بیشتر Pb در ریشه نسبت به بقیه اندام‌ها را گزارش کردند. بررسی میزان رشد چهار کلن *P. alba* در محیط آلوده به Pb (غلظت‌های ۰/۵ و یک میلی‌مولار) نیز کاهش ارتفاع، شاخه‌های فرعی و غلظت کلروفیل را نشان داد (Katanic *et al.*, 2008). در پژوهشی دیگر، Kovačević و همکاران (۲۰۱۳) تحمل به Pb را در پنج ژنوتیپ *P. alba* طی ۳۵ روز در غلظت‌های صفر، 10^{-3}، 10^{-2}، 10^{-1} و یک میلی‌مولار ارزیابی کردند و دریافتند که این غلظت‌ها برای گیاهان سمی نبودند.

گزارش اندکی از توانایی گیاه‌پالایی کلن‌های برتر صنوبرهای مورد استفاده در کشور در خاک‌های آلوده به Pb وجود دارد. در این زمینه می‌توان به مطالعه Alizadeh و همکاران (۲۰۱۴) اشاره کرد که نتایج تحقیق آنها نشان داد که حضور فلزات سنگین Pb، Cd و Cr در خاک منجر به کاهش اندازه صفات ریختی ریشه در نونهال‌های *P. nigra* و

www.SID.ir

Archive of SID

P. alba شده است. در بررسی Salehi و همکاران (۲۰۱۴)، خاک آلوده به سرب (تا غلظت ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم Pb) سبب کاهش رشد و زنده‌مانی نونهال‌های سپیدار (*P. alba* clone 44/9) شد. از آنجایی‌که Pb و ترکیبات آن اغلب به‌عنوان آلاینده‌های مهم و رایج با پتانسیل تجمع زیستی تهدیدکننده در گیاهان گزارش شده‌اند، مطالعه درخصوص تأثیر غلظت‌های مختلف Pb بر کلن‌های مختلف صنوبر برای انتخاب کلن مناسب به‌منظور انجام فرآیند گیاه‌پالایی، حائز اهمیت است. بر همین اساس، در پژوهش پیش‌رو، اندازه‌های رویشی و ارزیابی توانایی تحمل کلن ۵۶۱/۴۱ صنوبر اورامریکن (*P. euramericana* Guinier) در خاک آلوده به غلظت‌های زیاد Pb و کارایی انتقال Pb از ریشه به اندام هوایی گیاه مورد توجه قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

روش پژوهش

برای انجام این پژوهش ابتدا قلمه‌هایی به طول ۲۰ سانتی‌متر از کلن ۵۶۱/۴۱ صنوبر اورامریکن در اواخر بهمن‌ماه تهیه شد و تا زمان کاشت در سردخانه (دمای چهار درجه سانتی‌گراد) نگهداری شد. سپس از خاک زراعی ترکیب‌شده با ماسه که خصوصیات فیزیکی- شیمیایی آن از پیش تعیین شده بود (جدول ۱)، استفاده شد. برای آلوده‌سازی خاک، از نمک نیترات سرب ($Pb(NO_3)_2$) در پنج سطح صفر، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک استفاده شد (Rezvani *et al.*, 2012)، به‌طوری‌که در هر سطح تیمار، مقدار خاک مورد استفاده توزین شد و مقدار مناسب نمک نیترات سرب با آن مخلوط شد. در نیمه دوم فروردین، پس از اعمال تیمارهای Pb در خاک و پر کردن گلدان‌های پلاستیکی (۳۰× ۱۶× ۱۶ سانتی‌متر)، قلمه‌ها پس از خروج از سردخانه، به‌مدت ۲۴ ساعت در ظرف پر از آب نگهداری شدند و سپس با دو جوانه بالاتر از سطح خاک، در گلدان کاشته شدند. در نهایت گلدان‌ها به مکانی مسقف انتقال داده شدند. آبیاری نونهال‌ها در طول دوره آزمایش تا پایان مرداد به‌صورت یک روز در میان براساس ظرفیت زراعی خاک انجام شد. آزمایش در قالب طرح کامل تصادفی با پنج سطح تیمار Pb در سه تکرار (شش تا هفت نونهال به‌دست‌آمده از قلمه در هر تکرار) انجام شد. توقف آزمایش در انتهای مرداد به‌دلیل تلفات شدید نونهال (بیشتر از ۷۵ درصد) در سطوح تیمار ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم Pb بود.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش

ویژگی	مقدار
طبقه بافت	شنی- لومی
pH	۷/۸۶
قابلیت هدایت الکتریکی (dS/m)	۰/۴۹
ظرفیت تبادل کاتیونی (meq per 100g)	۲۴/۶۶
کربن آلی (درصد)	۰/۸۴
نیتروژن کل (درصد)	۰/۱۵۶
فسفر قابل جذب (mg/kg)	۴۸/۱۷
پتاسیم قابل جذب (mg/kg)	۲۶۴/۳۳
درصد مواد خنثی‌شونده (TNV%)	۲۲/۵

اندازه‌گیری‌ها

در پایان زمان آزمایش، درصد زنده‌مانی، رشد ساقه (طول ساقه و قطر یقه ساقه) و نیز تولید زی‌توده اندام‌های مختلف نونهال‌ها از طریق اندازه‌گیری وزن خشک آنها تعیین شد (Borghi *et al.*, 2008). برای اندازه‌گیری زنده‌مانی و رشد ساقه، تمام نونهال‌ها بررسی شدند. درصد زنده‌مانی نونهال‌ها طبق رابطه ۱ محاسبه شد (Salehi *et al.*, 2014). در این رابطه، S%، Ns و N*t* به‌ترتیب درصد زنده‌مانی، تعداد نونهال‌های زنده‌مانده و تعداد کل نونهال‌ها هستند.

$$S\% = \frac{Ns}{Nt} \times 100 \qquad \text{رابطه (۱)}$$

برای تعیین زی‌توده و غلظت Pb اندام‌های مختلف، به

www.SID.ir

Archive of SID

ازای هر سطح تیمار Pb، سه نونهال به‌طور تصادفی انتخاب شد. قابل ذکر است که در نونهال‌هایی که هر دو جوانه بالای سطح خاک قلمه رویش یافتند، برای طول و قطر یقه، ساقه بلندتر و برای زی‌توده، هر دو ساقه اندازه‌گیری شدند. پس از شستشوی نونهال، اندام‌های مختلف (ریشه، ساقه و برگ) از هم جدا شدند. تعداد برگ‌های هر نونهال شمارش شد و سطح سه برگ به‌طور کامل توسعه‌یافته از بالاترین قسمت هر نونهال با استفاده از سطح برگ‌سنج اندازه‌گیری شد (Yang *et al.*, 2007). برای تعیین وزن خشک و غلظت Pb، اندام‌های مختلف نونهال به‌مدت ۴۸ ساعت در داخل آون در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند (Hu *et al.*, 2013).

برای تعیین غلظت Pb اندام‌های گیاهی، ابتدا نمونه‌های خشک و آسیاب‌شده گیاهی، هضم اسیدی شدند. به‌طوری‌که، به ۰/۵ گرم نمونه خشک گیاهی پودرشده، ۱۰ میلی‌لیتر اسید نیتریک (H_2NO_3) غلیظ اضافه شد و سپس نمونه‌ها حدود ۱۲ ساعت زیر هود آزمایشگاه قرار گرفتند. پس از آن نمونه‌ها به‌مدت دو ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد گذاشته شدند و پس از خنک شدن، سه میلی‌لیتر اسید پرکلریدریک غلیظ به آنها اضافه شد و سپس به‌مدت چهار ساعت در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. سپس نمونه‌ها با کاغذ صافی واتمن ۵۰ صاف شدند و با آب دیونیزه به حجم ۲۵ میلی‌لیتر رسیدند. درنهایت، غلظت Pbنمونه‌های گیاهی با استفاده از دستگاه جذب اتمی شعله‌ای (مدل PU9400X) قرائت شد (Gupta, 2000). مقدار Pb هر اندام گیاهی نیز از حاصل‌ضرب متوسط زی‌توده هر اندام در متوسط غلظت Pb آن اندام محاسبه شد (Jakovljević *et al.*, 2014). سطح ویژه برگ نیز از نسبت سطح برگ به وزن خشک برگ متناظر محاسبه شد.

فاکتور انتقال (Translocation factor from concentration) و کارایی انتقال Pb (Translocation factor from accumulation) که نشان‌دهنده توانایی گیاه در انتقال فلز سنگین به اندام هوایی است، براساس غلظت فلز سنگین در اندام هوایی و ریشه طبق رابطه‌های ۲ و ۳ محاسبه شد (Wu *et al.*, 2010; Jakovljević *et al.*, 2014). شاخص تحمل (Tolerance index) نیز که درواقع معیاری برای سنجش بردباری گیاه نسبت به فلز سنگین است، طبق رابطه ۴ تعیین شد (Kovačević *et al.*, 2013).

$$TFc = \frac{C\ shoot}{C\ root} \qquad \text{رابطه (۲)}$$

$$TFa = \frac{(Cshoot \times Wshoot)}{(Croot \times Wroot)} \qquad \text{رابطه (۳)}$$

$$TI = \frac{W(Pb)}{W(control)} \times 100 \qquad \text{رابطه (۴)}$$

در رابطه ۲، TFc فاکتور انتقال سرب، C_{shoot} غلظت سرب اندام هوایی (mg/kg) و C_{root} غلظت سرب ریشه (mg/kg) را نشان می‌دهد. در رابطه ۳، TF_a کارایی انتقال سرب، W_{shoot} وزن خشک اندام هوایی (g)، W_{root} وزن خشک ریشه (g)، C_{shoot} غلظت سرب اندام هوایی (mg/kg) و C_{roor} غلظت سرب ریشه (mg/kg) و در رابطه ۴، TI درصد شاخص تحمل گیاه، $W_{(Pb)}$ وزن خشک گیاه رشدیافته در خاک آلوده (g) و $W_{(control)}$ وزن خشک گیاه شاهد (g) را نشان می‌دهد.

تجزیه و تحلیل آماری

تجزیه و تحلیل داده‌ها با نرم‌افزار SPSS انجام شد. ابتدا نرمال بودن و همگنی واریانس داده‌ها با آزمون‌های Shapiro-Wilk و Levene بررسی شد. سپس برای بررسی تأثیر سطوح مختلف تیمار Pb بر مشخصه‌های اندازه‌گیری‌شده (زنده‌مانی، رشد، تولید زی‌توده، شاخص تحمل، غلظت Pb اندام‌های گیاهی و فاکتور انتقال) از آزمون تجزیه واریانس (ANOVA) و برای گروه‌بندی و مقایسه میانگین‌ها از آزمون Tukey-HSD استفاده شد.

نتایج

نتایج نشان داد که زنده‌مانی نونهال‌ها در تمام غلظت‌های اعمال‌شده Pb (به‌جز غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و قطر ساقه نونهال‌ها در خاک آلوده به ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰

www.SID.ir

Archive of SID

میلی‌گرم بر کیلوگرم Pb نسبت به نونهال‌های شاهد به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. زی‌توده خشک ریشه، ساقه، برگ و کل نونهال، متوسط سطح برگ و متوسط سطح ویژه برگ نیز در غلظت‌های زیاد Pb به‌طور معنی‌داری کاهش یافت (جدول ۲).

جدول ۲- پارامترهای اندازه‌گیری‌شده نونهال *P. euramericana* رشدیافته در خاک آلوده به غلظت‌های مختلف سرب (میانگین ± اشتباه معیار)

پارامتر	سطوح مختلف سرب (mg/kg)					معنی‌داری
	صفر	۵۰۰	۱۰۰۰	۱۵۰۰	۲۰۰۰	
زنده‌مانی (٪)	۸۰/۲±۱۲/۵^{a}	۶۰/۳±۳/۲^{ab}	۴۴/۴±۶/۹^{bc}	۲۴/۶±۴^{c}	۱۹/۹±۴/۴^{c}	۰/۰۰۱**
ارتفاع نونهال (cm)	۴۴/۳±۲/۴^{a}	۴۷/۵±۱/۸^{a}	۴۳/۳±۲/۱^{a}	۳۹/۴±۲/۳^{a}	۳۹±۰/۹^{a}	۰/۱۷۱^{ns}
طول ریشه (cm)	۲۲/۲±۱/۵^{a}	۲۰/۲±۰/۶^{a}	۲۱±۱^{a}	۱۹/۵±۲/۲^{a}	۱۸/۷±۱/۵^{a}	۰/۵۶^{ns}
قطر ساقه (mm)	۶/۹±۰/۲^{a}	۷±۰/۲^{a}	۶/۲±۰/۲^{ab}	۵/۸±۰/۱^{b}	۵/۸±۰/۳^{b}	۰/۰۰۰**
سطح برگ (cm^2)	۵۹/۵±۴/۱^{a}	۶۱/۵±۲/۴^{a}	۴۴/۳±۲/۱۵^{b}	۳۱/۸±۱/۶^{c}	۳۱/۸±۳^{c}	۰/۰۰۰**
سطح ویژه برگ (cm^2/g)	۳۲۱/۸±۱/۷^{a}	۲۹۹/۶±۴/۹^{a}	۳۴۰/۳±۱۸/۶^{a}	۲۴۰/۱۵±۴/۴^{b}	۲۴۴/۴±۸^{b}	۰/۰۰۰**
زی‌توده خشک ریشه (g)	۰/۷۱±۰/۰۶^{ab}	۰/۹±۰/۱^{a}	۰/۴۹±۰/۰۲^{b}	۰/۴۸±۰/۰۲^{b}	۰/۴۷±۰/۰۱^{b}	۰/۰۰۱**
زی‌توده خشک ساقه (g)	۱/۸۶±۰/۰۴^{a}	۱/۵±۰/۰۵^{a}	۰/۹۴±۰/۱۱^{b}	۰/۹۳±۰/۰۹^{b}	۰/۹۱±۰/۰۹^{b}	۰/۰۰۰**
زی‌توده خشک برگ (g)	۲/۰۱±۰/۰۶^{a}	۲/۲۲±۰/۱۵^{a}	۱/۳۳±۰/۱۲^{b}	۱/۳±۰/۰۷^{b}	۱/۲۶±۰/۰۸^{b}	۰/۰۰۰**
زی‌توده خشک کل نونهال (g)	۴/۵۸±۰/۰۸^{a}	۴/۶۳±۰/۲۶^{a}	۲/۷۷±۰/۲۲^{b}	۲/۷۱±۰/۱۴^{b}	۲/۶۴±۰/۱۷^{b}	۰/۰۰۰**

**معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۹ درصد؛ ^{ns}غیرمعنی‌دار

حروف انگلیسی متفاوت در هر سطر، اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد را نشان می‌دهد.

غلظت و مقدار سرب اندام‌های ریشه، ساقه و برگ تحت تأثیر غلظت Pb خاک قرار گرفت. به‌طوری‌که در تمام سطوح Pb خاک، غلظت و مقدار سرب اندام‌ها نسبت به نونهال‌های شاهد بیشتر بود (به‌جز غلظت ۵۰۰ که غلظت سرب برگ کمتر از شاهد بود ۵/۲ <۶ /۵) (جدول ۳). همچنین در تمام سطوح Pb خاک، غلظت و مقدار Pb در ریشه همواره بیشتر از اندام‌های ساقه و برگ بود (شکل ۱).

جدول ۳- غلظت و مقدار سرب اندام‌های مختلف و کل نونهال *P. euramericana* رشدیافته در خاک آلوده به غلظت‌های مختلف سرب (میانگین ± اشتباه معیار)

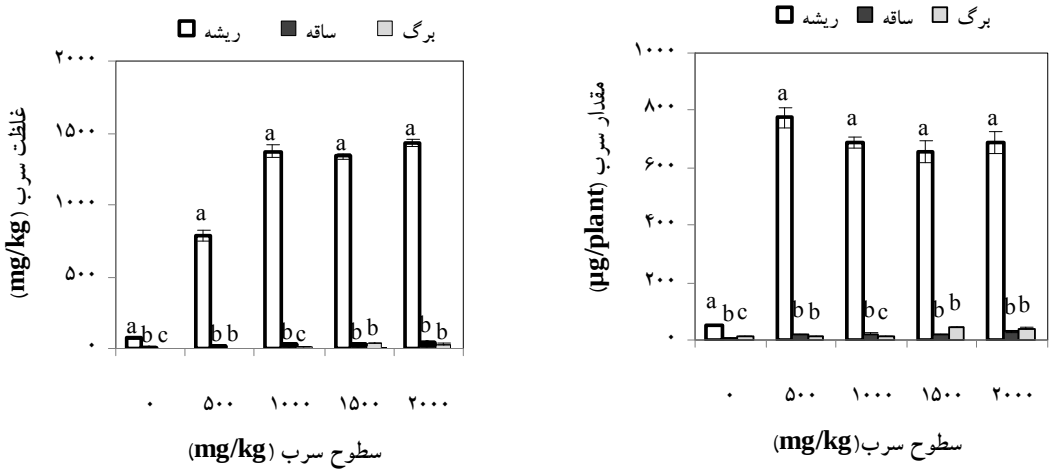
		سطوح مختلف سرب (mg/kg)					F	معنی‌داری
		صفر	۵۰۰	۱۰۰۰	۱۵۰۰	۲۰۰۰		
غلظت سرب (mg/kg)	ریشه	۷۱/۴۵±۳/۸^{c}	۷۸۲/۹±۳۹/۹^{b}	۱۳۳۷±۴۱/۷^{a}	۱۳۷۰/۹±۱۶/۳^{a}	۱۴۳۴/۸±۲۴/۹^{a}	۳۹۸/۰۳	۰/۰۰۰**
	ساقه	۲/۷±۰/۱^{d}	۱۲/۸±۰/۴^{c}	۲۲/۵±۱/۲^{b}	۲۱/۳±۰/۸^{b}	۳۳±۱/۷^{a}	۱۲۲/۶۹	۰/۰۰۰**
	برگ	۵/۶±۰/۳^{c}	۵/۲±۰/۲^{c}	۱۱±۰/۶^{b}	۳۴/۲±۲^{a}	۳۱±۲^{a}	۱۵۲/۴۱	۰/۰۰۰**
	کل	۷۹/۸±۳/۵۵^{c}	۸۰۰/۹±۴۰/۵۵^{b}	۱۴۰۴/۴±۴۱^{a}	۱۳۹۲/۵±۱۵/۴^{a}	۱۴۹۸/۹±۲۵/۷^{a}	۴۲۶/۲۵	۰/۰۰۰**
مقدار سرب (µg/plant)	ریشه	۵۰/۶±۱^{b}	۷۷۵/۳±۳۶/۶^{a}	۶۷۸/۷±۱۶/۹^{a}	۶۵۶/۲±۳۷/۱^{a}	۶۸۹/۴±۳۸/۵^{a}	۹۶/۲۱	۰/۰۰۰**
	ساقه	۵±۰/۴^{c}	۱۹/۲±۰/۸^{b}	۲۱±۲^{b}	۱۹/۷±۱^{b}	۲۹/۹±۲/۹^{a}	۲۴/۷۹	۰/۰۰۰**
	برگ	۱۱/۷۴±۰/۴^{b}	۱۲/۲±۰/۶^{b}	۱۴/۵±۰/۷^{a}	۴۴/۲±۰/۶^{a}	۴۰/۶±۲/۳^{a}	۱۹۶/۳۶	۰/۰۰۰**
	کل	۶۷/۴±۱^{b}	۸۰۶/۷±۳۷/۸^{a}	۷۱۴/۱۸±۱۶/۶^{a}	۷۲۰±۳۵/۱^{a}	۷۵۹/۹±۴۰/۸^{a}	۱۰۲/۸۳	۰/۰۰۰**

**معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۹ درصد

حروف انگلیسی متفاوت در هر سطر، اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد را نشان می‌دهد.

www.SID.ir

Archive of SID



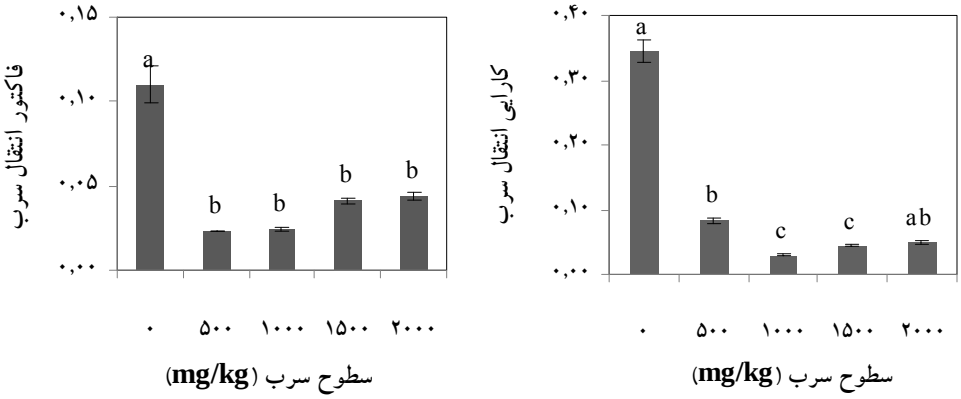
شکل ۱- مقایسه غلظت و مقدار سرب اندام‌های مختلف نونهال *P. euramericana* رشدیافته در خاک آلوده به غلظت‌های مختلف سرب (میانگین ± اشتباه معیار) (حروف انگلیسی متفاوت، اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد را نشان می‌دهد.)

بیشترین میزان فاکتور انتقال (نسبت غلظت Pb اندام هوایی به غلظت Pb ریشه) و کارآیی انتقال (مقدار Pb اندام هوایی به مقدار Pb ریشه) در نونهال‌های شاهد وجود داشت و در بقیه سطوح Pb این مقادیر بسیار کم بود. کارایی انتقال نونهال‌ها در غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نسبت به غلظت‌های بیشتر Pb، بیشتر بود (جدول ۴، شکل ۲).

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس (ANOVA) تأثیر تیمار سرب بر فاکتور انتقال، کارایی انتقال و شاخص تحمل نونهال *P. euramericana*

مشخصه	فاکتور انتقال	کارایی انتقال	شاخص تحمل (٪)		
			ریشه	اندام هوایی	نونهال
F	۵۴/۹۳	۲۵۵/۰۲۳	۴۷/۸۹	۵۱/۹۳	۴۵/۳۴
معنی‌داری	۰/۰۰۰**	۰/۰۰۰**	۰/۰۰۰**	۰/۰۰۰**	۰/۰۰۰**

**معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۹ درصد

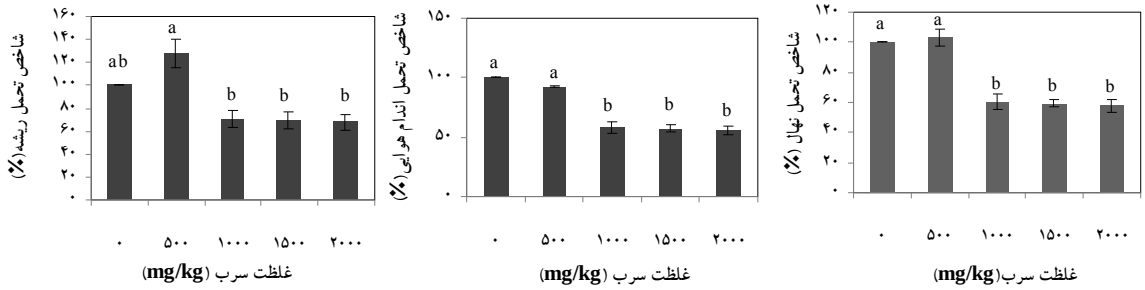


شکل ۲- فاکتور انتقال و کارایی انتقال سرب نونهال *P. euramericana* رشدیافته درخاک آلوده به غلظت‌های مختلف سرب (میانگین± اشتباه معیار) (حروف انگلیسی متفاوت، اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد را نشان می‌دهد.)

www.SID.ir

Archive of SID

شاخص تحمل اندام هوایی، ریشه و نونهال در غلظت‌های ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم Pb خاک نسبت به شاهد کاهش نشان داد. شاخص تحمل اندام هوایی و ریشه در غلظت‌های زیاد Pb به‌ترتیب ۵۰ و ۶۰ درصد و شاخص تحمل نونهال بین ۵۷/۷ تا ۱۰۳/۱ درصد در نوسان بود (جدول ۴، شکل ۳).



شکل ۳- شاخص تحمل ریشه، اندام هوایی و نونهال ***P. euramericana*** رشدیافته در خاک آلوده به غلظت‌های مختلف سرب (میانگین ± اشتباه معیار) (حروف انگلیسی متفاوت، اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد را نشان می‌دهد.)

بحث

نتایج پژوهش پیش‌رو در مورد نونهال‌های کلن ۵۶۱/۴۱ صنوبر اورامریکن تحت تأثیر غلظت‌های مختلف Pb، زنده‌مانی بین ۱۹/۹ تا ۸۰/۲ درصد را نشان داد، به‌طوری‌که نونهال‌های رشدیافته در غلظت ۲۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم Pb دارای کمترین میزان زنده‌مانی بودند (جدول ۲). زنده‌مانی درختان و به‌ویژه کلن‌های مختلف صنوبر در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین می‌تواند متفاوت باشد. برای مثال می‌توان به زنده‌مانی ۱۰۰ درصدی *P. deltoides* در خاک آلوده به کادمیوم (Tanvir & Siddqui, 2010)، زنده‌مانی صفر تا ۸۰ درصدی کلن‌های *P. alba* و *P. nigra* رشدیافته در خاک آلوده به فلزات Cu و Zn (Castiglione *et al.*, 2009) و زنده‌مانی ۴۰ تا ۱۰۰ درصدی نونهال‌های P. alba در خاک آلوده به Pb (Salehi *et al.*, 2014) اشاره کرد.

کاهش زی‌توده یکی از پاسخ‌های اولیه گیاهان نسبت به تنش فلزات سنگین است که شاخصی برای تحمل گیاه معرفی شده است (Landberg & Greger, 1996). در پژوهش پیش‌رو، رشد قطری ساقه و زی‌توده اندام‌های مختلف و زی‌توده کل نونهال در غلظت‌های زیاد Pb کاهش یافت (جدول ۲) که با یافته‌های Jakovljević و همکاران (۲۰۱۴) در مورد *P. nigra* و Salehi و همکاران (۲۰۱۴) در مورد نونهال‌های *P. alba* هم‌سو است. کاهش رشد و تولید زی‌توده گیاهان در بسترهای آلوده تحت تأثیر عامل‌های متعددی است که می‌توان به مواردی مانند تداخل در جذب عناصر غذایی گیاه (Borghi *et al.*, 2008)، اختلال در تعادل آبی و تغذیه‌ای سلول و کاهش وزن گیاه (Toppi & Gabbrielli, 1999)، تداخل در فعالیت‌های فتوسنتزی به‌دلیل تخریب ساختار کلروپلاست (Han et al., 2013) و کاهش سنتز کلروفیل (Salehi *et al.*, 2014) اشاره کرد.

در پژوهش پیش‌رو، سطح برگ در غلظت‌های بیشتر از ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم Pb و سطح ویژه برگ در غلظت بیشتر از ۱۵۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم Pb کاهش معنی‌داری نسبت به تیمار شاهد نشان داد (جدول ۲). درواقع تجمع Pb می‌تواند منجر به کاهش اندازه بافت مزوفیل و اندازه سلول‌های اپیدرمی شود که درنتیجه آن سطح برگ کاهش می‌یابد (Cai & Shi, 2009). هم‌سو با یافته‌های این پژوهش، Di Baccio و همکاران (۲۰۰۳) نیز کاهش سطح برگ نونهال‌های *P. deltoids* × *P. nigra* (*P.* × *euramericana*) را با افزایش غلظت Zn در بستر کشت گزارش کردند. درمقابل در مطالعه Salehi و همکاران

www.SID.ir

Archive of SID

(۲۰۱۴) پارامترهای سطح برگ و سطح ویژه برگ نونهال *P. alba* تحت تأثیر Pb (تا غلظت ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) کاهش نیافت.

با وجود این‌که در اغلب شرایط محیطی، فلزات سنگین ابتدا وارد ریشه می‌شوند و نخستین آثار زیان‌بار در این اندام ظاهر می‌شود (Toppi & Gabbrielli, 1999)، در پژوهش پیش‌رو در غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کاهشی در زی‌توده ریشه مشاهده نشد، اما در غلظت‌های ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم Pb و بیشتر، کاهش معنی‌داری در زی‌توده ریشه مشاهده شد (جدول ۲) که با نتایج Biró و Takács (۲۰۰۷) درخصوص نونهال‌های *P. nigra* و Alizadeh و همکاران (۲۰۱۴) در مورد صنوبرهای *P. alba* و *P. nigra* (در غلظت‌های کم فلز Pb) مطابقت دارد.

به‌طور کلی غلظت فلز سنگین در گیاه از مقدار آن در خاک پیروی می‌کند (Pukacki, 2000). در این مطالعه نیز میزان Pb در ریشه، ساقه و برگ نونهال‌ها با افزایش غلظت Pb در خاک افزایش یافت و این تجمع در ریشه بسیار بیشتر از ساقه و برگ بود (جدول ۳). نتایج مشابه توسط Pulford و همکاران (۲۰۰۱) درخصوص *P. euramericana* و *P. trichocarpa* تحت تأثیر فلز کروم و Salehi و همکاران (۲۰۱۴) در مورد *P. alba* تحت تأثیر فلز Pb گزارش شده است.

شاخص تحمل گیاه یکی از فاکتورهای مهم بررسی مقاومت گیاه در خاک آلوده به فلز سنگین است. در پژوهش پیش‌رو، دامنه شاخص تحمل زی‌توده خشک اندام هوایی، ریشه و نونهال در بین سطوح مختلف Pb به‌ترتیب بین ۹۵ تا ۱۳۰، ۵۶ تا ۶۷ و ۵۷/۷ تا ۱۰۳/۱ درصد در نوسان بود. در بین غلظت‌های Pb اعمال‌شده، شاخص تحمل نونهال‌ها در سه غلظت ۱۰۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم Pb نسبت به تیمار شاهد و غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم Pb کمتر بود (شکل ۳). در تقسیمات Landberg و Greger (۲۰۰۲)، دامنه شاخص تحمل کلن‌های حساس و مقاوم به‌ترتیب ۱۵ تا ۳۰ و ۷۰ تا ۸۵ درصد گزارش شده است. در این راستا، با توجه به اندازه شاخص تحمل کلن ۵۶۱/۴۱ صنوبر اورامریکن در غلظت‌های ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم Pb (حدود ۶۰ درصد)، می‌توان این کلن را ازنظر تحمل، متوسط تا خوب معرفی کرد.

فاکتور انتقال، مشخص‌کننده توانایی گیاه برای تجمع فلزات سنگین در اندام هوایی است. گیاه بیش‌انباشته‌گر گیاهی است که فاکتور انتقال در آن بیشتر از یک باشد و توانایی تجمع بیشتر از ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم Pb در اندام هوایی خود را داشته باشد (Mcgrath *et al.*, 2002). در پژوهش پیش‌رو، فاکتور انتقال نونهال‌های صنوبر کمتر از یک بود و میزان تجمع Pb در اندام هوایی بسیار کم و در ریشه بیشتر از ساقه و برگ بود، بنابراین صنوبر مورد مطالعه را نمی‌توان یک گیاه بیش‌انباشته‌گر Pb معرفی کرد. در تأیید این مطلب، Wu و همکاران (۲۰۱۰) و Jakovljević و همکاران (۲۰۱۴) اظهار می‌کنند که صنوبرها جزء گیاهان بیش‌انباشته‌گر نیستند.

درمجموع، با توجه به نتایج پژوهش پیش‌رو می‌توان گفت که کلن ۵۶۱/۴۱ صنوبر اورامریکن تحمل بسیار خوبی در غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم Pb خاک داشت. در غلظت‌های بیشتر، اگرچه تحمل این کلن کاهش یافت، اما از ۵۷ درصد کمتر نشد که مبین تحمل قابل قبول نونهال‌های این کلن به سمیت زیاد Pb خاک است. درمجموع با توجه به این‌که در ریشه، مقدار قابل توجهی Pb ذخیره شده است، می‌توان بیان کرد که این کلن با عمل تثبیت ریشه‌ای می‌تواند به جذب، تمرکز و ته‌نشینی Pb از محیط‌های آلوده کمک کند و در ردیف گونه‌های مطلوب برای پروژه‌های گیاه‌پالایی قرار گیرد.

References

- Alizadeh, S.M., Zahedi, A.G., Savaghebi, F.G., Etemad, V., Shirvany, A. and Shirmardi, M., 2012. Influence of soil amendment on cadmium accumulation responses in one-year old *Populus alba* L. seedling. Iranian Journal of Forest, 4(3): 355-366 (In Persian).
- Alizadeh, S.M., Zahedi, A.G., Shirmardi, M. and Shahriari, M.H., 2014. Effect of heavy metals (lead, cadmium and chromium) on some root

www.SID.ir

Archive of SID

Pollution Research, 21(5): 3792-3802.
- Kabata-Pendias, A., 2004. Soil-plant transfer of trace elements-an environmental issue. Geoderma, 122: 143-149.
- Katanic, M., Pilipovic`, A., Orlovic, S., Krstic, B., Kovacevic, B. and Pekec, S., 2008. The influence of lead on the in vitro growth and concentration of photosynthetic pigments in shoots of the white Poplar (*Populus alba*) clones. Lesnícky časopis-Forestry, 54(1): 29-36.
- Kovačević, B., Miladinović, D., Orlović, S., Katanić, M., Kebert, M. and Kovinčić, J., 2013. Lead tolerance and accumulation in white poplar cultivated In vitro. South-East European Forestry, 4(1): 3-12.
- Kramer, U., 2005. Phytoremediation: novel approaches to cleaning up polluted soils. Current Opinion in Biotechnology, 16: 133-141.
- Kvesitadze, G., Khatisashvili, G., Sadunishvili, T. and Ramsden, J.J., 2006. Biochemical Mechanisms of Detoxification in Higher Plants. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 245p.
- Landberg, T. and Greger, M., 1996. Differences in uptake and tolerance to heavy metals in *Salix* from unpolluted and polluted areas. Applied Geochemistry, 11: 175-180.
- Landberg, T. and Greger, M., 2002. Differences in oxidative stress in heavy metal resistant and sensitive clones of *Salix viminalis*. Plant Physiology, 159: 69-75.
- Malá, J., Máchová, P., Cvrčková, H. and Vaněk, T., 2007. Heavy metals uptake by the hybrid aspen and rowan-tree clones. Forest Science, 53(11): 491-497.
- McGrath, S.P., Zhao, F.J. and Lombi, E., 2002. Phytoremediation of metal, metalloids and radionuclides. Advance Agronomy, 75: 1-56.
- Motesharezade, B., Savaghebi, G.R., Alikhani, H., Mir Seyed Hosseini, H., 2008. An identification of heavy metals resistant plants and bacteria in the surrounding lands of Shazand, Arak lead and zinc mine, to be used in phytoremediation. Iranian Journal of Soil and Water Research, 1 (39): 163-174 (In Persian).
- Pukacki, P.M., 2000. Effects of sulphur, fluoride and heavy metal pollution on the chlorophyll fluorescence of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) needles. Dendrobiology, 45: 83-88.
- Pulford, I.D. and Dickinson, N.M., 2005. Phytoremediation technologies using trees: 375-395. In: Prassad, M.N.V. and Naidu, R. morphological characteristics of *Populus alba* L. and *Populus nigra* L. seedlings. Iranian Journal of Forest, 3(6): 267-277 (In Persian).
- Biró, I. and Takács, T., 2007. Study of heavy metal uptake of *Populus nigra* in relation to phytoremediation. Cereal Research Communications, 35(2): 265-268.
- Borghi, M., Tognetti, R., Monteforti, G. and Sebastiani, L., 2008. Responses of two poplar species (*Populus alba and Populus canadensis*) to high copper concentrations. Environmental and Experimental Botany, 62: 290-299.
- Cai, Q. and Shi, G., 2009. Leaf plasticity in peanut (*Arachis hypogaea* L.) in response to heavy metal stress. Environmental and Experimental Botany, 67: 112-117.
- Castiglione, S., Todeschini, V., Franchin, C., Torrigiani, P., Gastaldi, D., Cicatelli, A., Rinaudo, C., Berta, G., Biondi, S. and Lingua, G., 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.
- Di Baccio, D., Tognetti, R., Sebastiani, L. and Vitagliano, C., 2003. Responses of *Populus deltoides* × *Populus nigra* (*Populus* × *euramericana*) clone I-214 to high zinc concentrations. Journal of New Phytologist, 159(2): 443-452.
- Gupta, P.K., 2000. Soil, Plant, Water and Fertilizer Analysis. Agrobios, New Delhi, 483p.
- Han, Y., Wang, L., Zhang, X., Korpelainen, H. and Li, C., 2013. Sexual differences in photosynthetic activity, ultrastructure and phytoremediation potential of *Populus cathayana* exposed to lead and drought. Tree Physiology, 33(10): 1043-1060.
- He, J., Ma, C., Ma, Y., Li, H., Kang, J., Liu, T., Polle, A., Peng, C. and Luo, Z., 2013. Cadmium tolerance in six poplar species. Environmental Science and Pollution Research, 20: 163-174.
- Hu, Y., Nan, Z., Su, J. and Wang, N., 2013. Heavy metal accumulation by poplar in calcareous soil with various degrees of multi-metal contamination: Implications for phytoextraction and phytostabilization. Environmental Science and Pollution Research, 20(10): 7194-7203.
- Jakovljević, T., Bubalo, M.C., Orlović, S., Sedak, M., Bilandžić, N., Brozinčević, I. and Redovniković, I.R., 2014. Adaptive response of poplar (*Populus nigra* L.) after prolonged Cd exposure period. Environmental Science and

www.SID.ir

Archive of SID

(Eds.). Trace Elements in the Environment. CRC Press, New York, pp: 375-395.
- Pulford, I.D., Watson, C. and Mcgregor, S.D., 2001. Uptake of chromium by trees: prospects for phytoremediation. Environmental Geochemistry and Health, 23: 307-311.
- Rezvani, M., Zaefarian, F. and Gholizade, A.L., 2012. Lead and nutrients uptake by *Aeluropus littoralis* under different levels of lead in soil. Water and Soil Science, 3(22): 73-86 (In Persian).
- Salazar, M. and Pignata, M., 2014. Lead accumulation in plants grown in polluted soils, screening of native species for phytoremediation. Geochemical Exploration, 137(1): 29-36.
- Salehi, A., Tabari, M. and Shirvani, A., 2014. Survival, growth and Pb concentration of *Populus alba* (clone 44/9) seedling in Pb-contaminated soil. Iranian Journal of Forest, 4(6): 419-433 (In Persian).
- Tanvir, M.A. and Siddiqui, M.T., 2010. Growth performance and cadmium (Cd) uptake by *Populus deltoides* as irrigated by urban waste water. Pakistan Journal of Agricultural Sciences, 47: 235-240.
- Toppi, S.D.L. and Gabbrielli, R., 1999. Response to cadmium in higher plants-review. Environmental and Experimental Botany, 41: 105-130.
- Wu, F., Yang, W., Zhang, J. and Zhou, L. 2010. Cadmium accumulation and growth responses of a poplar (*Populus deltoides* × *Populus nigra*) in cadmium contaminated purple soil and alluvial soil. Hazard Mater, 177: 268-273.
- Yang, Y., Liu, Q., Han, C., Qiao, Y.Z., Yao, X.Q. and Yin, H.J., 2007. Influence of water stress and low irradiance on morphological and physiological characteristics of *Picea asperata* seedlings. Photosynthetica, 45: 613-619.

www.SID.ir

Archive of SID

Tolerance of *Populus euramericana* 561/41 to different concentrations of lead

A.S. Emami [1], M. Tabari Kouchaksaraei [2*], N. Bahramifar [3] and A. Salehi [4]

1- M.Sc. Student Forestry, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

2*- Corresponding author, Prof., Department of Forestry, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

3- Assistant Prof., Department of Environment, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

4- Assistant Prof., Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

Received: 18.08.2015 Accepted: 19.01.2016

Abstract

In this study, phytoremediation potential of *Populus euramericana* clone 561/41 to Pb-contaminated soils (0, 500, 1000, 1500, 2000 mg $Pbkg^{-1}$ soil) was investigated in greenhouse condition in a completely randomized design. The results showed that the survival was decreased about 19.9%, 35.8%, 55.6% and 60.3% in the soil polluted with 500, 1000, 1500, 2000 mg $Pbkg^{-1}$, respectively. However, increasing Pb did not lead to any notable changes in the length of root and stem. In addition, leaf area and biomass of root, stem, leaf and total (till 500 mg $Pbkg^{-1}$ soil) did not decrease, as well. The Pb concentration, content of plant organs, the greatest, and the lowest values allocated to root and leaf increased along with increasing Pb concentration of soil. The greatest values of translocation factor and tolerance indices of root, shoot and total plant were observed in 500 mg Pb kg^{-1}. The results generally demonstrated the good tolerance of the seedlings of *P. euramericana* clone 561/41 to Pb heavy metal in 500 mg kg^{-1} concentration. At higher concentrations of Pb, the results presented an acceptable tolerance, though the tolerance index of seedlings was reduced. Due to significant accumulation of Pb in the root (phytostabilization), this clone can therefore be introduced as an appropriate clone for phytoremediation of Pb-contaminated soils.

Keywords: Contaminated soil, Lead, phytoremediation, translocation factor, tolerance index.

www.SID.ir