

استفاده از گونه‌های درختی رطوبت‌پسند در جذب زیستی کادمیم در محیط‌های آلوده

محمد جوکار^۱، تیمور رستمی شاهراجی^۲، محسن محمدی^۳، ایوب گلیج^۴

۱- دانشجوی دکترای علوم جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان

(نویسنده مسئول) m.jokar20@yahoo.com

۲- دانشیار گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان

۳- استادیار گروه محیط زیست دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان

۴- دانشجوی دکترای علوم جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان

(دریافت ۹۴/۷/۲۳ پذیرش ۹۵/۳/۲۴)

چکیده

با توجه به آلودگی منابع آب و خاک و لزوم جذب، کاهش و تعدیل اثرات فلزات سنگین، ظرفیت زیست‌پالایی فلز کادمیم توسط گونه‌های درختی آب‌دوست صنوبر دلتونیدس و دارتالاب مورد بررسی قرار گرفت. پژوهش حاضر در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تیمار شامل شاهد، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک و سه تکرار انجام شد. نتایج نشان داد با افزایش میزان کادمیم محیط، غلظت کادمیم در اندام‌های مختلف دو گونه افزایش یافت، به طوری که بیشترین غلظت کادمیم در برگ، ساقه و ریشه دارتالاب و صنوبر دلتونیدس در تیمار ۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم و به ترتیب برابر با ۱۸/۶، ۳۵/۳۳، ۸۹/۰۶ و ۲۹/۴۴، ۶۱/۵۶، ۱۰۴/۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد. میزان غلظت کادمیم از ریشه به سمت ساقه و برگ‌ها در هر دو گونه دارای روند کاهشی بود. فاکتور انتقال کادمیم در دو گونه نسبت به شاهد افزایش یافت و بیشترین آن ۱/۱۰۶۵ و ۱/۰۰۶۱ مربوط به صنوبر و دارتالاب و در تیمار ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد. در راستای توسعه پایدار و استفاده بهینه از منابع آب و خاک و نظر به اهمیت تصفیه بیولوژیکی پساب‌ها و پاکسازی محیط زیست آلوده به خصوص فلزات سنگین، کشت گونه‌های آب‌دوست، صنوبر و دارتالاب با پتانسیل بالای گیاه‌پالایی به‌عنوان گونه‌های تجمع‌دهنده برای فلزات سنگین در محیط‌های آلوده پیشنهاد شد.

واژه‌های کلیدی: آلودگی، کادمیم، گیاه‌پالایی، آلودگی آب، آلودگی خاک

۱- مقدمه

به‌طور میانگین ۰/۵ میکروگرم در لیتر است (Ghosh & Singh, 2005) از آنجا که یکی از مهم‌ترین راه‌های قرارگیری انسان در معرض کادمیم، دریافت این عنصر از طریق غذاست، ارزیابی و کنترل مقدار آلودگی و شناسایی منابع آلاینده و تعدیل یا حذف آن‌ها نقش مهمی در سلامت انسان ایفا می‌کند. لذا ضرورت، جداسازی و خنثی کردن اثرات فلزات سنگین سمی از پساب‌های صنعتی کشاورزی و شهری، از مهم‌ترین سیاست‌های زیست‌محیطی کشورهای صنعتی و در حال توسعه است که یک مکانیسم بسیار مؤثر در پالایش آلاینده‌ها از محیط‌های آبی به‌شمار می‌رود (Igura et al, 2010). تاکنون روش‌های بسیاری از جمله، ترسیب شیمیایی با آهنک، شناورسازی الکتریکی، تبادل یونی، اسمز معکوس^۱، جذب سطحی تبخیر غلظتی، حذف زیستی، استخراج حلال و لخته‌سازی، برای

اگرچه فلزات سنگین به‌طور طبیعی در محیط وجود دارند اما گسترش شهرنشینی و توسعه فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی سبب پراکنده شدن این فلزات در بیوسفر و در نتیجه آلودگی خاک، اتمسفر و محیط‌های آبی شده است (Nagajyoti et al. 2010; Igura & Masanoti 2010). آب‌ها به میزان بسیار زیادی در معرض خطر آلودگی ناشی از دفع پساب‌های صنعتی، کشاورزی و تخلیه بدون کنترل فاضلاب‌های شهری به رودخانه‌ها و آب‌های سطحی و زیرزمینی هستند. این پساب‌ها با دارا بودن یون‌های فلزی سنگین از قبیل کادمیم، به‌علت سمیت زیادشان مشکلات محیط‌زیست فراوانی را پدید می‌آورند. کادمیم از جمله فلزات سنگین است که به‌طور طبیعی در خاک وجود دارد. میزان کل این فلز غیرضروری در خاک‌ها ۰/۰۱ تا ۳ میلی‌گرم در کیلوگرم و میزان مجاز آن در آب‌ها

¹ Reverse Osmosis (RO)

شهری و صنعتی، نشان داده است که گونه *E. camaldulensis* از نظر سازگاری، رشد ارتفاعی و قطری و قدرت جذب فلزات، موفق‌تر از سایر گونه‌ها بوده است (Rad et al. 2013). در یک مطالعه گلخانه‌ای نشان داده شده است که گونه *Holm Oak* استقامت بالایی در برابر آلودگی خاک به کادمیم دارد و ریشه آن در جذب این فلز توانایی بالایی دارد (Dominguez Maria et al. 2009).

نتایج بررسی غلظت فلزات سنگین مس، سرب، روی و منگنز درختان کاج و نمدار در صربستان نیز نشان داد که میزان سرب در ریشه کاج و نمدار بیشتر از اندام‌های هوایی است (Serbula et al. 2013).

در فرایند گیاه‌پالایی، یکی از مهم‌ترین نکات متضمن موفقیت و پاسخ‌دهی مناسب، انتخاب گیاه کارا و متناسب است که قابلیت رشد در محیط آلوده را داشته و بتواند در طی رشد خود با انتقال مواد آلاینده‌های نامطلوب به اندام‌های خود، پالایش، تصفیه زیستی بهینه، ارزان و آسان انجام دهد (Or Cutt 2000). با توجه به تنوع گونه‌های درختی و توان آنها در مقابل آلاینده‌های محیطی با یک انتخاب درست می‌توان از آنها در جذب، کاهش و حذف کامل آلاینده‌های مختلف بهره‌گرفت، به عبارت دیگر هدف یافتن گونه‌های گیاهی با سرعت بالاتر رشد و توانایی مؤثر در جذب فلزات سنگین است از این رو درک اساس ژنتیکی و فیزیولوژیکی مقاومت به فلزات سنگین برای انتخاب گونه‌های مناسب برای رویشگاه‌هایی که در معرض آلاینده‌ها با فلزات سنگین هستند، اهمیت زیادی دارند (Larcher 2003). نظر به اینکه گونه‌های صنوبر دلتوئیدس^۱ و دار تالاب^۲ از گونه‌های آب‌دوست و سریع‌الرشد هستند که به دلیل داشتن ویژگی‌های خاص، دارای توانایی زنده‌مانی و رشد در حاشیه مزارع، مناطق غرقابی و پساب‌ها و کناره رودخانه‌ها را دارند (National Research Council 2002; Tavin 2002; Karrenberg et al. 2002) و توجه به ضرورت جذب کاهش و خنثی‌سازی اثرات فلزات سنگین سمی از پساب‌های صنعتی، کشاورزی و شهری، به منظور جلوگیری از آلودگی منابع آب و خاک و ارتقاء کیفیت این منابع، در این پژوهش به بررسی ظرفیت زیست

پاک‌سازی مواد سمی و کاهش میزان عناصر سنگین ورودی به محیط در تصفیه آب‌ها و فاضلاب‌های آلوده به فلزات سنگین به‌کار گرفته شده است (Ai Phing & Zaharin Aris 2014; Lacour et al. 2001).

این روش‌ها مقدار زیادی آلودگی فاضلاب را کاهش می‌دهند و کیفیت حذف را بهبود می‌بخشند ولی هریک از این فرایندها محدودیت‌هایی از نظر فنی و اقتصادی دارند (Elouear, Z. et al. 2008; Diane et al. 2002). پژوهش‌های مختلفی نشان داده است که روش‌های بیولوژیکی می‌تواند شرایط اقتصادی‌تر و کارآمدتری را در مقایسه با بسیاری از روش‌های فیزیکی-شیمیایی فراهم نماید (Ai Phing, Zaharin Aris 2014; Henry 2000).

توانایی بالای برخی گونه‌های گیاهی در جذب عناصر و ترکیب‌های آلوده‌کننده، امکان استفاده از گیاهان در پاک‌سازی محیط‌های آلوده را فراهم می‌کند، این امر در دهه‌های اخیر مورد توجه فراوان قرار گرفته است (Ghosh & Singh 2005; He Jali et al. 2013).

در واقع پالایش گیاهی به‌عنوان یکی از روش‌های زیست‌پالایی، فرایندی طبیعی است که از گیاهان برای تحریک میکروارگانیسم‌های سم‌زدا و نابودگر آلودگی‌ها استفاده می‌شود و به دلایل تأثیر زیاد، هزینه‌های کم، تخریب کم، هماهنگی با طبیعت و قابلیت استفاده در مقیاس وسیع، با استقبال زیادی روبه‌رو شده است (Fan kui-chu et al. 2011; Nikolic et al. 2008; Pulford & Watson 2003).

گونه‌های مختلف گیاهی قادر به جذب فلزات سنگین از محیط خود هستند اما در این میان، درختان نسبت به گیاهان علفی صفات ویژه‌ای دارند. به‌عنوان مثال، تولید زیئوده زیاد، سیستم ریشه‌ای توسعه‌یافته، نسبت به گونه‌های زراعی و مرتعی منابع غذایی برای دام‌ها نبوده و میزان تبخیر و تعرق زیاد که موجب افزایش جریان آب در درخت و انتقال فلزات به اندام‌های هوایی می‌شود (Castigione et al. 2006). گونه‌هایی با ریشه‌های عمیق مثل گونه *Pinus sylvestris* قادر به کاهش حلالیت و تحریک‌پذیری سرب موجود در خاک است و می‌تواند در کاهش آلودگی آب‌های زیرزمینی آلوده به سرب استفاده شود و سرب را در اندام‌های خود ذخیره نماید (Turpeinen et al. 2002). بررسی سازگاری و عملکرد هشت گونه و پروپانانس اکالیپتوس با استفاده از فاضلاب

¹ (*Populus deltoides* Bartr. ex Marsh.)

² (*Taxodium distichum* (L.) Rich)

پالایی و قابلیت جذب کادمیم توسط گونه درختی آب‌دوست صنوبر دلتونیدس و دارتالاب، در محیط‌های آلوده پرداخته شد.

۲- مواد و روش‌ها

به‌منظور اجرای این پژوهش از نهال‌های گلدانی یکساله گونه صنوبر دلتونیدس و سرو دارتالاب پرورش یافته در نهالستان لاکان واقع در استان گیلان استفاده شد. در تهیه نهال‌ها سعی بر آن بود تا بهترین و همسان‌ترین نهال‌های دارای سیستم ریشه‌ای و قطر مشابه و فاقد شاخه و برگ اضافی باشند، انتخاب شوند. خاک غیرآلوده مورد استفاده به نسبت شش سهم خاک رایج نهالستان (بافت لومی - رسی) و یک سهم ماسه بود. پس از خشک نمودن خاک در دمای محیط، نمونه‌های خاک از الک دو میلی‌متری عبور داده شده و به‌طور یکنواخت با هم مخلوط شد. مقادیر کادمیم بستر کاشت در این پژوهش شامل صفر (شاهد)، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک بود. در انتخاب غلظت‌های فلز سنگین اعمال شده سعی شد دو مورد مدنظر قرار گیرد. یکی اینکه آلودگی‌های موجود در محیط زیست حتماً در محدوده غلظت‌های اعمال شده قرار داشته باشند و دوم اینکه با در نظر گرفتن یکی از اهداف بسیاری از مطالعات گیاه‌پالایی مبنی بر تعیین پتانسیل گیاه، غلظت‌های بالاتر آلودگی نیز اعمال شود (Jyoti et al. 1994). برای رسیدن به سطوح آلودگی مدنظر، نخست، مقدار کادمیم (از منبع نیترا کادمیم) لازم برای آلوده‌سازی جرم مشخصی از خاک محاسبه شد. سپس و در خارج از گلدان‌ها مقدار خاک لازم برای هر یک از تیمارها و تکرارها تهیه و مقدار آلاینده مورد نظر به خاک اضافه شد. طی این فرایند، خاک به آرامی و به‌طور پیوسته به هم زده شد تا حداکثر اختلاط لازم بین خاک و آلاینده فراهم شود. بعد از تهیه بسترهای آلوده مورد نظر، گلدان‌ها با خاک آلوده پر شدند. آزمایش‌های لازم در گلدان‌هایی با ظرفیت ۱۵ لیتر انجام شد. به‌دلیل سوراخ بودن گلدان‌ها جهت جلوگیری از آبشویی و از دسترس خارج شدن فلزات، پلاستیک‌هایی بدون منفذ در داخل آنها قرار داده شد. گلدان‌های قبل از کاشت نهال‌ها، تا رطوبت اشباع آبیاری و به‌مدت یک ماه برای رسیدن به تعادل لازم بین خاک و آلاینده به حال خود رها شدند تا بر همکنش آلاینده‌ها و خاک تکوین یافته و شرایط آلودگی طبیعی‌تر شود. نهال‌های مورد بررسی

در اواخر اسفندماه و همزمان با شروع فصل رویش در گلدان‌ها کشت شدند و در ادامه به‌مدت زمان یک دوره رویشی و تا شروع فصل خزان اجازه رشد یافته و تحت مراقبت قرار گرفتند. به‌منظور نزدیک‌تر شدن به شرایط واقعی گلدان‌ها در شرایط یکسان و در فضای باز و محیط طبیعی قرار داده شدند تا گیاه در شرایط طبیعی‌تر رشد کند. آبیاری گلدان‌ها با آب معمولی و با توجه به نیاز آبی گیاهان به‌طور کاملاً یکسان برای تمام گلدان‌ها انجام گرفت. آبیاری به‌گونه‌ای انجام شد که هیچ نوع تنش آبی رخ نداده و رطوبت در حد ظرفیت زراعی حفظ شود.

نمونه‌گیری از خاک و اندام‌های مختلف نهال‌ها شامل برگ، ساقه و ریشه در آخر فصل رویش صورت پذیرفت. کلیه نمونه‌های اندام‌ها پس از شستشو با آب معمولی، آب مقطر و قرارگیری در آون به‌مدت ۴۸ ساعت در ۸۰ درجه سلسیوس، در آون خشک شدند. نمونه‌های خشک شده با استفاده از آسیاب برقی با محفظه استیل آسیاب شدند. عصاره‌گیری از ۲۵/۰ گرم نمونه آسیاب شده به کمک ۴ میلی‌لیتر اسید سولفوریک و سپس پراکسید هیدروژن ۳۰ درصد و در دمای ۴۴۰ درجه سلسیوس با استفاده از دستگاه Digesdahl (Hachoir) انجام شد (Pitchel & Bradway 2008). غلظت آلاینده‌ها در هریک از نمونه‌ها با دستگاه ICP^۱ تعیین شد (Youngsoo et al. 2009). ضریب تجمع زیستی^۲ و فاکتور انتقال^۳، مشخص‌کننده توانایی گیاهان برای تحمل و تجمع فلزات سنگین در اندام‌های خود است. برای بررسی میزان انتقال فلزات از ریشه به اندام هوایی، فاکتور انتقال از تقسیم غلظت فلز در اندام هوایی به غلظت آن در ریشه تعیین شد. ضریب تجمع زیستی نیز از نسبت غلظت فلز در اندام‌های گیاهی به مقدار فلز در خاک تعیین شد (Massimo et al. 2008; Chehregani et al. 2009). این پژوهش در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار مستقل برای هر تیمار انجام شد. تجزیه واریانس داده‌ها با نرم‌افزار SPSS، مقایسه میانگین تیمارها با آزمون دانکن^۴ در سطح احتمال ۵ درصد و رسم نمودارها با نرم‌افزار Excel انجام شد.

¹ Inductivity Coupled Plasma (ICP)

² Bioconcentration factor

³ Translocation factor

⁴ Duncan

جدول ۱- تجزیه واریانس اثر تیمارهای مختلف کادمیم بر غلظت آن در اندام‌های مختلف دارتالاب

Table 1. Variance analysis of the impacts of different cadmium treatments on its concentration in the different organs of Taxodium

Sources of change	Degree of freedom	Square means		
		Leaf Cd Concentration (mg/kg)	Stem Cd Concentration (mg/kg)	Root Cd Concentration (mg/kg)
Treatment	3	193.09*	769.46**	7937.23**
Error	8	0.60	2.42	1.44

** Significant differences at 1% level, * Significant differences at 5% level, and ns=Insignificant

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر تیمارهای مختلف کادمیم بر غلظت آن در اندام‌های مختلف صنوبر دلتوئیدس

Table 2. Analysis of variance for the impacts of different Cadmium treatments on its concentration in the different organs of Deltoedes Spruce

Sources of change	Degree of freedom	Square means		
		Leaf Cd Concentration (mg/kg)	Stem Cd Concentration (mg/kg)	Root Cd Concentration (mg/kg)
Treatment	3	493.54**	2423.35**	7081.83**
Error	8	1.15	1.17	1.57

** Significant differences at 1% level, * Significant differences at 5% level, and ns=Insignificant

میلی‌گرم کادمیم بود که این تفاوت از لحاظ آماری معنی‌دار نبود. نتایج مقایسه میانگین انباشت کادمیم در ساقه نشان داد که روند انباشت کادمیم افزایشی بوده و بیشترین افزایش انباشت در حد فاصل تیمار ۵۰ تا ۱۰۰ میلی‌گرم مشاهده شد. همچنین مشاهده شد که این روند در حد فاصل بین تیمارهای ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم کادمیم اگرچه افزایشی بوده ولی اختلاف معنی‌داری نداشت. انباشت کادمیم در ریشه‌ها نیز روند افزایشی داشت که بیشترین مقدار مربوط به حد فاصل تیمارهای ۵۰ تا ۱۰۰ و کمترین آن مربوط به حد فاصل غلظت‌های ۱۰۰ تا ۱۵۰ میلی‌گرم کادمیم بود. در مورد ریشه‌ها در تمامی سطوح تیمارها اختلاف غلظت کادمیم معنی‌دار بود.

شکل ۲ میزان انباشت فلز کادمیم در اندام‌های مختلف نهال صنوبر دلتوئیدس را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت کادمیم در خاک، کادمیم جذب شده در، برگ، ساقه و ریشه نهال‌های مورد بررسی افزایش یافته است. غلظت کادمیم تجمع یافته در برگ‌های صنوبر دلتوئیدس بین ۰/۷۴ تا ۲۹/۴۴ در ساقه بین ۰/۸۲ تا ۶۱/۵۶ و در ریشه بین ۲/۷۶ تا ۱۰۴/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم به دست آمد. بالاترین میزان غلظت کادمیم در ریشه‌ی صنوبر دلتوئیدس و در غلظت ۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم به میزان ۱۰۴/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم ثبت شد. در بررسی روند انباشت کادمیم مشاهده شد که بیشترین افزایش در انباشت

۳- نتایج

خلاصه نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای مختلف کادمیم بر غلظت آن در اندام‌های مختلف نهال‌های دارتالاب و صنوبر دلتوئیدس به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ آمده است. مقدار تجمع کادمیم در ساقه، ریشه و برگ‌های نهال دارتالاب با یکدیگر دارای اختلاف معنی‌داری هستند. غلظت کادمیم در ریشه نسبت به برگ به‌طور قابل توجهی بیشتر بود. به‌طوری که مقدار کادمیم جذب شده در ریشه در تیمار ۱۵۰ میلی‌گرم در حدود ۴ و نیم برابر همین غلظت در برگ بود.

همچنین مقدار تجمع کادمیم در ساقه، ریشه و برگ‌های نهال صنوبر دلتوئیدس با یکدیگر دارای اختلاف معنی‌داری بودند. به‌طوری که مقدار کادمیم جذب شده در ریشه در تیمار ۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم در حدود ۴ و ۳ برابر همین غلظت در برگ و ساقه بود.

مقادیر انباشت فلز کادمیم اندام‌های مختلف نهال‌دارتالاب، در غلظت‌های مختلف عناصر مورد بررسی در شکل ۱ نشان داده شده است. بالاترین میزان غلظت کادمیم در ریشه دارتالاب و در غلظت ۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد. بررسی روند انباشت کادمیم نشان داد که بیشترین افزایش در انباشت کادمیم در برگ‌ها با اختلاف معنی‌داری در حد فاصل غلظت ۵۰ میلی‌گرم کادمیم و شاهد و کمترین مقدار آن در حد فاصل غلظت ۱۰۰ تا ۱۵۰

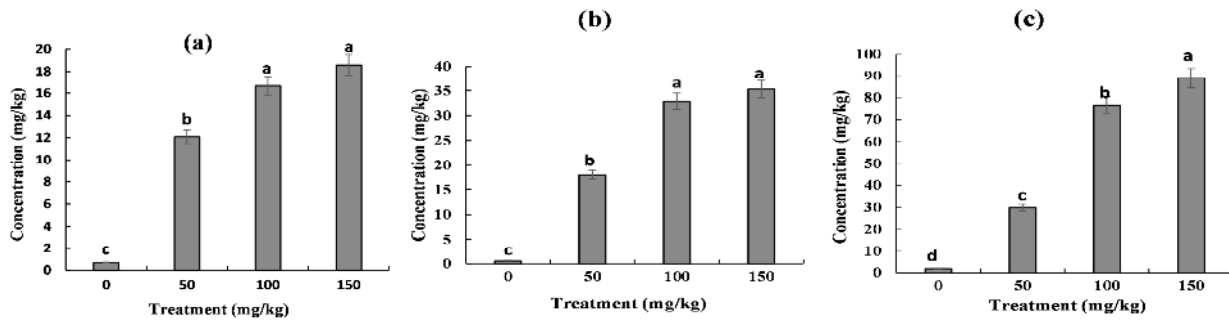


Fig. 1. a) Cadmium concentration in Taxodium roots, b) Cadmium concentration in Taxodium stem and branches, and c) Cadmium concentration in Taxodium leaves (Different characters indicate statistical significance at 5% probability level)

شکل ۱- (a) میزان غلظت کادمیم در ریشه نهال دارتالاب، (b) میزان غلظت کادمیم در ساقه و شاخه نهال دارتالاب، (c) میزان غلظت کادمیم در برگ نهال دارتالاب (حروف انگلیسی متفاوت نشان دهنده تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد است).

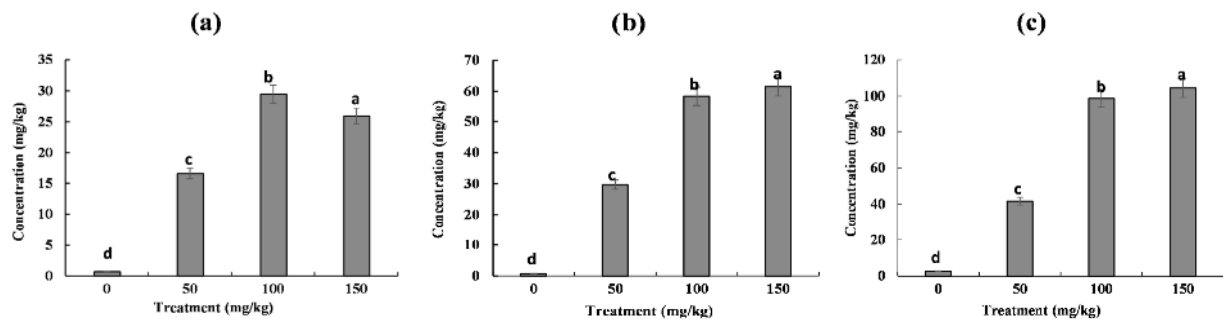


Fig. 2. a) Cadmium concentration in Deltoedes Spruce roots, b) Cadmium concentration in Deltoedes Spruce stem and branches, and c) Cadmium concentration in Deltoedes Spruce leaves (Different characters indicate statistical significance at 5% probability level)

شکل ۲- (a) میزان غلظت کادمیم در ریشه نهال صنوبر دلتوئیدس، (b) میزان غلظت کادمیم در ساقه نهال صنوبر دلتوئیدس، (c) میزان غلظت کادمیم در برگ نهال صنوبر دلتوئیدس (حروف انگلیسی متفاوت نشان دهنده تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد است).

میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم بود. در مورد ریشه‌ها نیز در تمامی سطوح تیمارها اختلاف غلظت کادمیم معنی‌دار بود. مقادیر ضریب تجمع زیستی و فاکتور انتقال به ترتیب در جدول ۳ نشان داده شده است. بررسی فاکتور انتقال در نهال‌ها نشان داد که بالاترین فاکتور انتقال کادمیم معادل $1/0.65$ و در سطوح آلودگی ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم مربوط به گونه صنوبر دلتوئیدس است. در خصوص ضریب تجمع زیستی نیز نتایج نشان داد که بالاترین و پایین‌ترین ضریب تجمع زیستی کادمیم معادل $0/869$ و $0/1080$ و به ترتیب در سطوح آلودگی شاهد گونه دارتالاب و ۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم رخ داده است. روند ضریب تجمع

کادمیم در برگ‌ها با اختلاف معنی‌داری در حد فاصل غلظت ۵۰ میلی‌گرم کادمیم و شاهد بود. کمترین مقدار روند انباشت در حد فاصل غلظت ۱۰۰ تا ۱۵۰ میلی‌گرم کادمیم و به صورت کاهشی مشاهده شد که این تفاوت از لحاظ آماری معنی‌دار بود. نتایج مقایسه میانگین انباشت کادمیم در ساقه نشان داد که روند انباشت کادمیم افزایشی و با اختلاف معنی‌دار در تمامی سطوح بوده و بیشترین افزایش انباشت در حد فاصل تیمار ۵۰ تا ۱۵۰ میلی‌گرم کادمیم مشاهده شد. انباشت کادمیم در ریشه‌ها نیز روند افزایشی داشت، که بیشترین مقدار مربوط به حد فاصل تیمارهای ۵۰ تا ۱۵۰ و کمترین آن مربوط به حد فاصل غلظت‌های ۱۰۰ تا ۱۵۰

Table 3. Comparison of average impacts of different Cadmium treatments on conveyance factor and bioaccumulation coefficient in *Taxodium* and *Deltoedes Spruce*

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر تیمارهای مختلف کادمیم بر فاکتور انتقال و ضریب تجمع زیستی در دارتالاب و صنوبر دلتوئیدس

Species	Cd Concentration	Transfer factor	Cumulative biological coefficient
Taxodium	0	0.6669b	0.8692a
	50	1.006a	0.2600b
	100	0.6472b	0.1533bc
	150	0.6055b	0.1180c
Deltoedes Spruce	0	0.6045d	0.4007a
	50	1.1065a	0.3453b
	100	0.8900bc	0.2625c
	150	0.8365cd	0.1080d

Different letters represent significant differences at 5% level.

حاضر با مشاهدات در مورد گونه توت سفید همسو است. این پژوهشگران نتیجه گرفتند که توت سفید بیشترین مقدار کادمیم را در ریشه خود در مقایسه با برگ‌ها انباشته می‌کند (Prince et al. 2000; Wang et al. 2003).

این در حالی است که در برخی تحقیقات بیشترین مقدار تجمع فلز روی در برگ‌های توت سفید اندازه‌گیری شده است (Ashfagh et al. 2010). فرم قابل جذب کادمیم توسط گیاه کاملاً مشخص نشده ولی به نظر می‌رسد که ریشه عمدتاً یون فلزی آزاد را از محلول خاک جذب می‌کند. مقدار کادمیمی که از ریشه به ساقه، برگ و اندام‌های هوایی حرکت می‌کند، بستگی به عواملی چند از جمله گونه گیاهی، نوع خاک و غلظت اولیه کادمیم موجود در خاک دارد (Taylor & Percival 2001; Yargholi et al. 2010). نتایج حاصل نشان داد که با افزایش غلظت کادمیم، مقدار تجمع کادمیم در کلیه اندام‌های گیاهی افزایش یافت. این یافته با نتایج بسیاری از محققین همسو است (He, Jali et al. 2013; Fan, Kui-chu et al. 2011; Wu et al. 2010). احتمالاً دلیل افزایش غلظت کادمیم در اندام‌های گیاهی، افزایش زیست‌فراهمی این فلز در خاک بوده است (He, Jali et al. 2013).

بر اساس نتایج حاصل بیشترین مقدار انباشت در اندام‌های زیرزمینی نهال‌های دارتالاب و صنوبر رخ داد، یکی از دلایل این امر می‌تواند این باشد که گیاه با استفاده از مکانیسم‌هایی آلاینده را در اندام‌هایی نظیر واکوئل‌ها رسوب داده و از انتقال آن به اندام‌های هوایی جلوگیری می‌کند (Shah et al. 2001). در هر صورت، جذب عناصر سنگین در واکوئل‌ها و به‌ویژه در دیوار سلولی برای گیاه از سمیت بسیار کمتری برخوردار است که ممکن است در مورد این دو گونه نیز این فرایند صورت گرفته باشد (Wojcik et al. 2005).

زیستی هر دو گونه کاهشی بوده به‌خصوص در مورد گونه صنوبر که این اختلافات در همه سطوح معنی‌دار مشاهده شد.

۴- بحث

بر پایه نتایج به‌دست آمده روند انباشت فلز کادمیم در اندام‌های مختلف نهال‌های دارتالاب به این شکل بود که بیشترین انباشت در ریشه، سپس در ساقه و در نهایت برگ‌ها کمترین غلظت کادمیم را به خود اختصاص دادند. این روند همسو با نتایج برخی مطالعات قبلی در بررسی گیاه‌پالایی صنوبر هیبرید (*P. alba* × *P. tremula*) و گیاه‌پالایی فلز کادمیم گونه *Salix viminalis* است که آنها نیز روند مشابهی اعلام کردند (Pilon-Smits et al. 1998; Mcers et al. 2005). نتایج پژوهش‌های قبلی بررسی مشخص کرده است که مقدار کروم در ریشه دو زیرگونه سپیدار به نام‌های *P. trichocarpa* و *P. euroamericana* در مقایسه با دیگر اندام‌ها بیشتر بوده است (Nikolic et al. 2008). در مطالعه دیگری نشان داده شد که برگ‌های گونه *P. alba* مقادیر بیشتری کادمیم و روی را نسبت به ریشه و ساقه در خود جمع کرده‌اند (McGee et al. 2006). این در حالی است که برخی پژوهش‌ها نشان داده‌اند که بیشترین مقدار کادمیم در برگ‌های *P. alba* در مقایسه با دیگر اندام‌ها یافت می‌شود (Dominguez-maria et al. 2009; Lotte Van Nevel et al. 2007).

در گونه صنوبر دلتوئیدس نیز بیشترین مقدار تجمع فلز سنگین کادمیم (۱۰۴/۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در تیمار ۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در ریشه وجود داشت که در محدوده سمی کادمیم قرار بوده است (Kabata-Pendias & Pendias 1984). نتایج بررسی

کادمیم مناسب است. نکته دیگر این که مقادیر ضریب تجمع زیستی کادمیم صنوبر دلتوئیدس و دارتالاب، از تیمار شاهد به سمت ۱۵۰ میلی‌گرم کادمیم در حال کاهش بوده و این احتمال وجود دارد که در غلظت‌های بالاتر، گیاهان مذکور انباشت‌کننده این عنصر نباشد. بنابراین قضاوت درباره اینکه آیا این گونه‌ها در غلظت‌های بالاتر از ۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم همچنان برداشت‌کننده است و یافتن آستانه انباشت گیاهی نیاز به بررسی بیشتری دارد. دلیل تفاوت مقادیر فاکتور انتقال و ضریب تجمع زیستی کادمیم صنوبر دلتوئیدس و دارتالاب ناشی از تفاوت در سرعت رشد و میزان زیتوده تولیدی این دو گونه است.

در راستای مدیریت پساب‌های صنعتی و آلودگی‌های ناشی از آن و با توجه به نتایج فوق می‌توان گفت که تجمع کادمیم در محدوده سمی فلزات مورد نظر در اندام‌های دو گونه صنوبر دلتوئیدس و دارتالاب بدون نشان دادن علائم مسمومیت، به همراه توانایی تولید زیتوده بالا، رشد مناسب، جوانه‌زنی آسان و سیستم ریشه‌ای توسعه یافته آنها در اکوسیستم‌های آبی دلایلی هستند که علاوه بر داشتن فاکتور انتقال کمتر کادمیم، این دو گونه را برای حذف و کاهش کادمیم از محیط مناسب می‌سازد. در راستای توسعه پایدار و استفاده بهینه از منابع آب و خاک و نظر به اهمیت تصفیه بیولوژیکی پساب‌ها و پاکسازی محیط زیست آلوده به‌خصوص فلزات سنگین، کشت گونه‌های آب‌دوست، صنوبر و دارتالاب با پتانسیل بالای گیاه‌پالایی به‌عنوان گونه‌های تجمع‌دهنده برای فلزات سنگین در محیط‌های آلوده پیشنهاد می‌شود.

فاکتور انتقال، مشخصه‌ای است که در ارزیابی موفقیت فرایند گیاه‌پالایی مطرح است. این شاخص در گیاهان بیش انباشت بیشتر از یک است. در این تحقیق، افزایش آلودگی کادمیم بر روی گونه‌های مورد بررسی تأثیرات متفاوت کاهشی و افزایشی نشان داد. در بررسی فاکتور انتقال کادمیم توسط ۵ گونه بید نتیجه گرفته شد که افزایش آلودگی کادمیم در برخی کلون‌ها موجب افزایش و در برخی دیگر موجب کاهش فاکتور انتقال می‌شود (Kuzovkina et al. 2004).

بر اساس مطالعات صورت گرفته گونه‌ای که دارای ضریب تجمع زیستی در ریشه بزرگ‌تر از یک و فاکتور انتقال کوچک‌تر از یک باشد، برای تثبیت گیاهی و گونه‌ای که دارای ضریب تجمع زیستی در اندام‌های هوایی بزرگ‌تر از یک باشد، برای برداشت گیاهی مناسب است (Chehregani et al. 2009). بررسی فاکتور انتقال کادمیم در نهال‌های مورد مطالعه نشان داد که بالاترین فاکتور انتقال دارتالاب معادل ۱/۰۰۶ و در صنوبر دلتوئیدس معادل ۱/۱۰۶۵ و در سطح آلودگی ۵۰ میلی‌گرم کادمیم رخ داده است. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که فاکتور انتقال، ضریب تجمع زیستی در اندام‌های هوایی و ضریب تجمع زیستی در برگ‌ها برای گونه *P. alba* به ترتیب ۱۰، ۵/۲ و ۲ است (Domingues Maria et al. 2009).

۵- نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش بیان می‌کند که صنوبر و دارتالاب در تمامی سطوح مورد بررسی (غیر از ۵۰ میلی‌گرم کادمیم)، دارای فاکتور انتقال کمتر از یک بودند، بنابراین این گونه‌ها برای تثبیت عناصر

References

- Ai Phing, L. & Zaharin Aris, A., 2014, "A review on economically adsorbents on heavy metals removal in water and wastewater", *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 13(2), 163-181.
- Ashfaq, M., Wakeel, A. & Asif, M., 2010, "Effect of Zn (II) deposition in soil on mulberry-silk worm food chain", *African Journal of Biotechnology*, 9, 1-11.
- Castiglione, S., Cinzia, F., Tiziana, F., Guido, L., Patrizia, T. & Stefania, B., 2006, "High zinc concentrations reduce rooting capacity and alter metallothionein gene expression in white poplar - (*Populus Alba* L. cv. Villafranca)", *Chemosphere*, 67, 1117-1126.
- Chehregani, A., Noori, M. & Lari Yazdi, H., 2009, "Phytoremediation of heavy-metal-polluted soils: Screening for new accumulator plants in Angouran mine (Iran) and evaluation of removal ability", *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 72, 1349-1353.
- Diane, B.W., Hari, R., Xue, H., Behra, Ph. & Sigg, L., 2002, "Adsorption of Cu, Cd, and Ni on goethite in the presence of natural groundwater ligands", *Environmental Science and Technology*, 36(3), 328-336.

- Domínguez María, T., Madrid, F., Marañón, T. & Murillo., J. M., 2009, "Cadmium availability in soil and retention in oak roots: Potential for phytostabilization", *Chemosphere*, 76, 480-486.
- Elouear, Z., Bouzid, J., Boujelben, N., Feki, M. & Montiel, A., 2008, "The use of exhausted olive cakeash (EOCA) as a low cost adsorbant for removal of toxic ions from aqueous solutions", *Fuel*, 87, 2582-2589.
- Fan, K.Ch., Hsi, H.Ch., Chen, Ch. W., Lee, H.L., & Hseu, Z.Y., 2011, "Cadmium accumulation and tolerance of mahogany (*Swietenia macrophylla*) seedlings for phytoextraction applications", *Journal of Environmental Management*, 92, 2818-2822.
- Ghosh, M. & Singh, S. P., 2005, "A comparative study of cadmium phytoextraction by accumulator and weed species", *Environmental Pollution*, 133, 365-371.
- He, J., Ma, Ch., Ma, Y., Li, H., Kang, J., Liu, T. et al., 2013, "Cadmium tolerance in six poplar species", *Environmental Science and Pollution Research*, 20, 163-174.
- Henry, J., 2000, *An overview of the phytoremediation of lead and mercury*, U.S. Environmental Protection Agency Office of Solid Waste and Emergency Response Technology Innovation Office Washington, D.C.
- Igura, M. & Masanori, O., 2010, "Cadmium sorption characteristics of phosphorylated sago starch-extraction residue", *Journal of Hazardous Materials*, 178(1), 686-692.
- Jyoti, M., Pandey, V. & Singh, N., 1994, "Effects of some heavy metals on root growth of germinating seeds of *Vicia faba*", *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 29(10), 2229-2234.
- Kabata-pendias, A. & Pendias, H., 1984, *Trace elements in soils and plants*, CRC, Florida.
- Karrenberg, S. E., Jakob, P., Java, K., 2002, "The life history of Salicaceae living in the active zone of floodplains", *Freshwater Biol.*, 47, 733-748.
- Kuzovkina, Y. A., Knee, M. & Quigley, M. F., 2004, "Cadmium and copper uptake and translocation in Five Willow (*Salix L.*) Species", *International Journal of Phytoremediation*, 6(3), 269-287.
- Lacour Salt, B. J. & Arcos, R., 2001, "Removal of heavy metals in industrial wastewaters by ion-exchanger grafted textiles", *Anal. Chim. Acta*, 428, 121-132.
- Larcher, W., 2003, *Physiological plant ecology. Ecophysiology and strees, physiology of functional crops*, 4th Ed., Springer, Verlag Berlin Heidelberg, Germany.
- Lotte Van Nevel, M. J., De Schrijver, A., Piesschaert, F., Oosterbaan, A., MG Tack, F. & Verheyen, K., 2007, "Tree species effect on the redistribution of soil metals", *Environmental Pollution*, 149, 173-181.
- Massimo, Z., Pietrini, F., Mugnozza, G.S., Iori, V., Pietrosanti, L. & Massacci, A., 2008, "Metal tolerance, accumulation and translocation in poplar and willow clones treated with cadmium in hydroponics", *Water Air Soil Pollut.*, 197, 23-34.
- McGee, Ch. J., Fernandez, I.J., Norton, S. A. & Stubbs. C.S., 2006, "Cd, Ni, Pb, and Zn concentration in forest vegetation and soils in Maine", *Water Air Soi. Pollut.*, 180, 141-153.
- Meers, E. S., Vervaeke, L. P., Hopgood, M., Lust, N. & Tack, F. M. G., 2005, "Availability of heavy metals for uptake by *Salix viminalis* on a moderately contaminated dredged sediment disposal site", *Environmental Pollution*, 137, 354-364.
- Nagajyoti, P. C., Lee, K. D. & Sreekanth, T. V. M., 2010, "Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: A review", *Enviromental Chemistry Letters*, 8, 199-216.
- National Research Council, 2002, *Riparian areas: Functions and strategies for management*, National Academy Press, Washington, USA.
- Nikolic, N., Kojic, D., Pilipovic, A., Pajevic, S., Krstic, B., Borisev, M. & Orlovic, S., 2008, "Responses of hybrid poplar to cadmium stress: Photosynthetic characteristics, cadmium and proline accumulation, and antioxidant enzyme activity", *Acta Biologica Cracoviensia Series Botanica*, 50, 95-103.

- Orcutt, D. M., 2000, *The physiology of plants under stress: Soil and biotic factors (Vol. 2)*, John Wiley and Sons, N.Y.
- 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.
- Pitchel, J. & Bradway, D. J., 2008, "Conventional crops and organic amendments for Pb, Cd and Zn treatment at a severely contaminated site", *Bioresource Technology*, 99, (5), 1242-1251.
- Prince, W., Sentilkumar, P. & Subburam, V., 2000, "Mulberry- silk worm food chain- A template to assess heavy metal mobility in terrestrial ecosystems", *Environ. Monitor Assess.*, 69, 231-238.
- Pulford, I. D. & Watson, C., 2003, "Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees—a review", *Environment International*, 29 (4), 529-540.
- Rad, M.H., Sardabi, H. & Ghelmani, S.V., 2013, "Compatibility of different eucalyptus species and provenances under sewage irrigation using Yazd City wastewater treatment plant effluent", *Journal of Water and Wastewater*, Vol. 25 No. 1 (89), 85-94. (In Persian)
- Serbula, Snezana, M., Tanja, S., Kalinovic, Ana, A., Jelena, I. V. & Steharnik, M. M., 2013, "Assessment of airborne heavy metal pollution using Pinus spp. and Tilia spp", *Aerosol and Air Quality Research*, 13, 563-573.
- Shah, J., Sayles, G., Suidan, M., Mihopoulos, P. & Kaskassian, S. S., 2001, "Anaerobic bioventing of unsaturated zone contaminated with DDT and DNT", *Water Sci. Technol.*, 43(2), 35-42.
- Tavin, K.T., 1997, "Responses of woody plants to flooding and salinity", *Tree Physiol. Mon.*, 1, 1-29.
- Taylor, M. D. & Percival, H. J., 2001, "Cadmium in soil solutions from a transect of soils away from a fertilizer bin", *Environ. Pollut.*, 113, 35-40.
- Turpeinen, A. M., Marja Mutanen, Antti Aro, Salminen, I., Basu, S., Palmquist, D.L. & Mikko Griinari, J., 2002, "Bioconversion of vaccenic acid to conjugated linoleic acid in humans", *The American Journal of Clinical Nutrition*, 76 (3), 504-510.
- Wang, K. R., Gong, H., Wang, Y. & Van Der Zee, S. E. A. T. M., 2003, "Toxic effect of cadmium on *Morus alba* L. and *Bombyx mori* L", *Plant and Soil*, 261, 171- 180.
- Wójcik, M., Vangronsveld, J. & Tukiendorf, H., 2005, "Cadmium tolerance in *Thalaspia caerulescens*. Growth parameters, metal accumulation and phytochelatin synthesis in response to cadmium", *Environmental and Experimental Botany*, 53, 151-161.
- 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.
- Yargholi, B., Azimia, A. A., Baghvand, A., Abbasi, F., Liaghat, A.M. & Asadelahfardi, Gh.R., 2010, "Investigation of cd adsorption and accumulation from contaminated soil in different parts of root crops", *Journal of Water and Wastewater*, Vol 20, No.4 (72), 60-70. (In Persian)
- Youngsoo, Ch. Bolick, J. A. & Butcher, D.J., 2009, "Phytoremediation of lead with green onions (*Allium fistulosum*) and uptake of arsenic compounds by moonlight ferns (*Pteris cretica* CV Mayii)", *Microchemical Journal*, 91, (1), 6-8.