

رشد و جذب فلزات سنگین نهال‌های دو ساله دو کلن صنوبر کبوده در خاک آبیاری شده با پساب شهری

آزاده صالحی^{۱*}، فاطمه احمدلو^۲ و رضا باقری^۳

*۱- نویسنده مسئول، استادیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

پست الکترونیک: az.salehi@rifr-ac.ir

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

۳- کارشناس ارشد پژوهش، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۰۷

چکیده

این پژوهش با هدف بررسی عملکرد نهال‌های دو کلن صنوبر کبوده پس از دو فصل رویش در خاک آبیاری شده با پساب شهری انجام شد. بدین منظور آزمایشی گلدانی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو فاکتور (۱) خاک متأثر از نوع آبیاری در دو سطح (۲) کلن صنوبر در دو سطح انجام گردید. در هر دو کلن صنوبر کبوده، پس از دو فصل رویش، افزایش معنی‌دار پارامترهای رشد، سطح برگ، زی‌توده اندام‌گیاهی و جذب و تجمع عناصر غذایی و فلزات سنگین در اندام‌های گیاهی نهال‌های تیمار شده با خاک متأثر از پساب شهری نسبت به نهال‌های شاهد (خاک آبیاری شده با آب معمولی) مشاهده شد. در هر دو کلن صنوبر، بیشترین جذب و تجمع عناصر آهن، مس، نیکل، کروم و سرب در ریشه و عناصر روی و منگنز در برگ دیده شد. دو کلن صنوبر کبوده پس از دو فصل رویش، از نظر رشد و تولید زی‌توده تفاوت معنی‌داری را نشان ندادند، اما تأثیر کلن بر جذب و تجمع بیشتر عناصر غذایی کم‌مصرف و فلزات سنگین در اندام‌های گیاهی معنی‌دار بود. به‌طور کلی نهال‌های کلن *P. alba* 20/45 مقادیر بیشتری از عناصر غذایی کم‌مصرف و فلزات سنگین را در اندام‌های گیاهی خود انباشته کردند. شاخص مقاومت اندازه‌گیری شده دو کلن صنوبر کبوده پس از دو فصل رویش در خاک متأثر از پساب شهری بالای ۱۰۰ درصد بود و دو کلن از نظر این شاخص تفاوت معنی‌داری را نشان ندادند. با توجه به عملکرد مناسب نهال‌های دو کلن صنوبر کبوده در خاک متأثر از پساب شهری پس از دو فصل رویش، این دو کلن صنوبر کبوده برای زراعت چوب در اراضی متأثر از پساب‌های شهری می‌توانند پیشنهاد شوند.

واژه‌های کلیدی: پساب، خاک آلوده، زراعت چوب، صنوبر، گیاه‌بالایی.

مقدمه

چرخه غذایی انسان نمی‌شوند، علاوه بر کاهش فشار روی منابع آب شیرین، با قابلیت افزایش سطح عناصر غذایی خاک می‌تواند در افزایش تولید زی‌توده گیاهی نیز سهم بسزایی داشته باشد. همچنین آبیاری با پساب‌های تولیدی مزایای قابل توجهی برای تعادل اکولوژیکی و بهبود ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی خاک و کیفیت محیط‌زیست

از آنجایی که پساب‌های شهری به‌طور معمول می‌توانند حاوی انواع آلودگی‌های میکروبی، فیزیکی و شیمیایی باشند، جمع‌آوری، تصفیه و استفاده دوباره از آنها با رعایت مسائل محیط‌زیستی از اهمیت زیادی برخوردار است. استفاده از پساب‌های شهری در آبیاری محصولاتی که وارد

به افزایش رشد گونه‌های صنوبر آبیاری شده با پساب اشاره کرده‌اند.

با افزایش روند شهرنشینی و صنعتی شدن، روزانه حجم قابل توجهی پساب و رواناب‌های سطحی در کلان‌شهرها تولید می‌شود. نظر به اهمیت مدیریت پساب‌های شهری و استفاده از آنها با رعایت مسائل محیط‌زیستی از یکسو و مطالعات کمی که در ارتباط با تأثیر آبیاری با پساب‌های شهری بر عملکرد گونه‌های تندرشدی مانند صنوبرها گزارش شده است، در این پژوهش، رشد، تولید زی‌توده و جذب عناصر غذایی و فلزات سنگین نهال‌های دو کلن صنوبر کبوده (*Populus alba* 20/45 و *P. alba* 44/13) پس از دو فصل رویش در خاک آبیاری شده با پساب شهری بررسی شد.

مواد و روش‌ها

مواد (گیاه، خاک و آب)

در این مطالعه دو کلن صنوبر کبوده (*P. alba* 20/45) و (*P. alba* 44/13) که جزء کلن‌های پربازده می‌باشند و طی آزمایش‌های سازگاری متعدد انجام شده توسط محققان مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، توان تولید چوب بالا و سازگاری آنها با مناطق نیمه‌خشک کشور به اثبات رسیده است، بررسی شد. خاک‌های مورد استفاده در این مطالعه از ایستگاه تحقیقاتی البرز مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور و اراضی کشاورزی جنوب شهر تهران که سالیان متمادی متأثر از پساب شهری بوده است، تهیه گردید. در ابتدای کار، از خاک‌های مورد استفاده، سه نمونه خاک برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی برداشت شد. پساب شهری مورد استفاده در این مطالعه، رواناب سطحی جاری در جنوب شهر تهران بود. این پساب شهری ترکیبی از آوردهای کوهستانی و شهری و بخشی از فاضلاب‌های مسکونی و صنعتی است و در رده فاضلاب‌های خام و بدون تصفیه قرار می‌گیرد (Salehi, 2020). پساب شهری به‌طور منظم دو بار در ماه در بشکه‌های پلاستیکی ۱۲۰ لیتری جمع‌آوری و به محل پژوهش منتقل گردید. از پساب شهری

فراهم می‌کند (Ali et al., 2013). جنگل‌کاری و زراعت چوب در اراضی متأثر از پساب‌های شهری می‌تواند به‌عنوان یک گزینه مهم و مناسب با اهداف چندمنظوره برای مدیریت و استفاده دوباره از پساب‌ها مورد توجه قرار گیرد (Salehi, 2020). مطالعات پیشین نیز نشان داده است که بسیاری از گونه‌های درختی غیرمثمر مانند صنوبر تبریزی (Salehi et al., 2021)، کاج تهران (Salehi et al., 2008)، افاقیا (Tabari & Salehi, 2009)، زیتون (Aghabarati et al., 2008)، اکالیپتوس (Guo et al., 2006)، و غیره قابلیت کشت در اراضی متأثر از پساب‌های شهری را بدون آنکه اختلالی در فرایند رشد گیاه ایجاد شود، دارند.

درختان صنوبر با دارا بودن بسیاری از ویژگی‌های گیاه ایدئال مانند رشد سریع، جذب بالای عناصر غذایی و فلزات از خاک، نیاز رطوبتی بالا و سیستم ریشه‌ای گسترده می‌توانند در اراضی متأثر از پساب‌های شهری به‌طور موفقیت‌آمیزی مورد استفاده قرار گیرند (French et al., 2006; Robinson et al., 2007; Tzanakakis et al., 2009). از سوی دیگر، مطالعات گیاه‌پالایی نشان داده است که درختان صنوبر توانایی پالایش خاک از طریق جذب و تجمع فلزات سنگین در اندام‌های گیاهی خود را دارند، بنابراین، با کاشت آنها در خاک‌های آلوده در درازمدت می‌توان در جهت کاهش آلاینده‌های خاک نیز گام برداشت (Baldantoni et al., 2014; Goliński et al., 2015; Pilipović et al., 2019; Mleczek et al., 2019; Mataruga et al., 2020). در همین راستا، Aryal و Reinhold (۲۰۱۵) گزارش کردند که آبیاری صنوبر هیبرید (*Populus deltoides* × *nigra*) با پساب نه تنها تأثیر منفی بر پارامترهای رشد صنوبر نداشت، بلکه صنوبر مورد مطالعه توانایی جذب و تجمع فلزات سنگین را در اندام‌های گیاهی نشان داد. همچنین Tsakou و همکاران (۲۰۰۳) با بررسی *P. euramericana* (Aronsson و Dimitriou, ۲۰۱۱) با مطالعه بر روی چند گونه صنوبر و بید و Salehi و همکاران (۲۰۲۱) با بررسی سه کلن صنوبر تبریزی، در مطالعات خود

گل اشباع (Rhoades, 1982)، ماده آلی به روش والکل-بلاک (Nelson & Sommers, 1996)، نیتروژن کل به روش کج‌دال (Bremner, 1996)، فسفر قابل جذب به روش اولسن (Olsen *et al.*, 1954) و پتاسیم قابل جذب به روش استات آمونیوم نرمال (Page *et al.*, 1982) تعیین شد. غلظت عناصر غذایی کم‌مصرف (آهن، روی، منگنز و مس) و فلزات سنگین (نیکل، کروم و سرب) نمونه‌های خاک نیز پس از هضم اسیدی نمونه‌ها در دستگاه هضم مایکروویو، با استفاده از دستگاه ICP-MS (PerkinElmer ICP-MS: Elan 9000 DRC-E, USA) اندازه‌گیری شد. در این پژوهش، برای کنترل کیفیت آزمایش و ارزیابی صحت داده‌های عناصر و فلزات سنگین اندازه‌گیری شده از ماده مرجع تأیید شده CRM059-Trace Metals-Loamy Clay (Sigma-Aldrich, USA) 2 استفاده شد.

اندازه‌گیری ویژگی‌های ریشی و غلظت عناصر غذایی و فلزات سنگین در اندام‌های گیاهی

پس از دو فصل رویش، با انتخاب تصادفی چهار نهال به ازای هر تیمار، پارامترهای رشد (قطر و طول ساقه) و زی‌توده اندام‌های گیاهی (ریشه، ساقه و برگ) اندازه‌گیری شد. در هر نهال انتخابی، پارامتر سطح برگ با استفاده از دستگاه سطح برگ‌سنج (Leaf Area Meter: Gate House, Model 4cht Aok) تعیین شد. برای تعیین زی‌توده خشک، پس از شست‌وشوی نهال‌ها، اندام‌های مختلف (ریشه، ساقه و برگ) از هم جدا و در دستگاه آون به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. شاخص مقاومت که در واقع معیاری برای سنجش بردباری گیاه در محیط آلوده است، براساس وزن خشک گیاه طبق رابطه (۱) اندازه‌گیری شد (Landberg & Greger, 2002).

مورد استفاده در زمان‌های مختلف (چهار بار در فصل رویش)، برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی نمونه‌برداری شد.

روش تحقیق

این پژوهش به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو فاکتور (۱) خاک متأثر از نوع آبیاری در دو سطح (خاک آبیاری شده با آب معمولی و خاک آبیاری شده با پساب شهری) و (۲) کلن صنوبر در دو سطح (*P. alba* 44/13 و *P. alba* 20/45) در کل با چهار تیمار انجام شد. بدین منظور، اوایل اسفندماه گلدان‌های پلاستیکی با خاک‌های جمع‌آوری شده پر شدند. اواسط اسفندماه، قلمه‌های همگن (از نظر قطر و ارتفاع قلمه) کلن‌های صنوبر مورد مطالعه (به ازای هر تیمار پنج قلمه در سه تکرار و در کل ۶۰ گلدان برای چهار تیمار) در گلدان‌های آماده کاشته شد و گلدان‌ها تا پایان پژوهش (به مدت دو فصل رویش) در فضای باز مسقف نگهداری شدند. آبیاری گلدان‌های پرشده با خاک اراضی جنوب تهران با پساب شهری و آبیاری گلدان‌های پر شده با خاک معمولی با آب معمولی دو بار در هفته و به صورت کاملاً یکسان از نظر مقدار آب برای تمام تیمارها با استفاده از پارچ پلاستیکی مدرج یک لیتری تا پایان پروژه انجام شد.

اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی آب و خاک در آزمایشگاه pH و EC نمونه‌های آب با استفاده از دستگاه‌های pH متر و EC سنج (PL-700PC, Taiwan) و غلظت عناصر غذایی و فلزات سنگین با استفاده از دستگاه ICP-MS (PerkinElmer ICP-MS: Elan 9000 DRC-E, USA) اندازه‌گیری شد. بافت خاک به روش هیدرومتری (Bouyoucos, 1962)، اسیدیته (pH) به روش گل اشباع (Mclean, 1982)، هدایت الکتریکی (EC) به روش عصاره

رابطه (۱) $100 \times \text{وزن خشک گیاه شاهد} / \text{وزن خشک گیاه رشد کرده در خاک آلوده} = \text{شاخص مقاومت}$

(1954) و پتاسیم به روش استات آمونیوم نرمال (Page *et al.*, 1982) اندازه‌گیری شد. غلظت عناصر غذایی

در نمونه‌های گیاهی، نیتروژن به روش کج‌دال (Bremner, 1996)، فسفر به روش اولسن (Olsen *et al.*,

شهری مورد استفاده در این مطالعه آمده است. مقایسه ویژگی‌های این پساب شهری با استانداردهای سازمان محیط‌زیست ایران، (FAO Food and Agriculture Organization) و (EPA Environmental Protection Agency) نشان می‌دهد که این آب از نظر pH، EC و سطح عناصر غذایی و فلزات سنگین در محدوده مجاز آب آبیاری می‌باشد. در جدول ۲ ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک‌های مورد استفاده در این مطالعه آمده است. براساس نتایج، سطح فلزات سنگین موجود در خاک آبیاری شده با پساب شهری از مقادیر متوسط جهانی فلزات سنگین در خاک بیشتر است.

ویژگی‌های رویشی

تیمار خاک متأثر از پساب شهری تأثیر معنی‌دار آماري بر ویژگی‌های رویشی نهال‌های دو ساله دو کلن صنوبر کبوده داشت. به طوری که در هر دو کلن صنوبر، افزایش معنی‌دار ($P < 0.01$) پارامترهای رشد (قطر و طول ساقه) و زی توده خشک اندام‌های ریشه، ساقه، برگ و کل نهال‌های تیمار شده با خاک آبیاری شده با پساب شهری نسبت به نهال‌های شاهد (تیمار شده با خاک آبیاری شده با آب معمولی) مشاهده شد. در مقابل، تأثیر کلن تنها بر نسبت زی توده اندام هوایی به ریشه در هر دو تیمار خاک معنی‌دار ($P < 0.05$) بود. البته تأثیر متقابل تیمارهای خاک و کلن بر هیچ یک از پارامترهای مورد بررسی معنی‌دار نبود (جدول ۳ و شکل ۱).

کم مصرف (آهن، روی، منگنز و مس) و فلزات سنگین (نیکل، کروم و سرب) در اندام‌های گیاهی نیز پس از هضم اسیدی نمونه‌ها در دستگاه هضم مایکروویو، با استفاده از دستگاه ICP-MS (PerkinElmer ICP-MS: Elan 9000 DRC-E, USA) تعیین گردید. برای کنترل کیفیت آزمایش و ارزیابی صحت داده‌های عناصر و فلزات سنگین اندازه‌گیری شده از دو ماده مرجع تأیید شده (NCS ZC73018, GSB-11- Citrus leaves) و (China National Analysis Centre for Iron and Steel Reference Materials and Measurements, Institute for CD281- Rey Grass) و (European Commission) در این پژوهش استفاده شد.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

تجزیه و تحلیل داده‌ها با نرم‌افزار آماري SPSS انجام شد. با استفاده از آزمون‌های Shapiro-Wilk و Levene نرمال بودن و همگنی واریانس داده‌ها بررسی شد. با توجه به نرمال و همگن بودن داده‌ها، برای بررسی تأثیر تیمارهای خاک و کلن و همچنین تأثیر متقابل این دو تیمار بر ویژگی‌های رویشی و جذب و تجمع عناصر غذایی و فلزات سنگین در اندام‌های گیاهی از آزمون تجزیه واریانس دوطرفه (ANOVA) و برای گروه‌بندی و مقایسه میانگین‌ها از آزمون دانکن استفاده شد.

نتایج

ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی پساب شهری و خاک در جدول ۱ ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی پساب

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی پساب شهری

Table 1. Physico-chemical properties of municipal effluent

پارامتر Parameter		pH	EC (ds/m)	N	P	K	Ca	Mg
پساب شهری Municipal effluent		7.13	1.12	24.92	1.96	12.4	64.6	9.22
سازمان محیط‌زیست Environmental Protection Agency	(mg/l)	6.5-8.4	3	30	-	-	-	-
FAO ²		6-8.5	0-3	0-15	0-2	-	-	-
US EPA ³		6.5-8.4	0.7-3	5-30	0.04-0.4	10-20	40-70	5-20
پارامتر Parameter		Fe	Zn	Cu	Mn	Ni	Cr	Pb
پساب شهری Municipal effluent	(µg/l)	80	88	26	30	30	15.96	93
سازمان محیط‌زیست Environmental Protection Agency	(mg/l)	5	2	0.2	0.2	0.2	0.1	5
FAO ²		5	2	0.2	0.2	0.2	0.1	5
US EPA ³		5	2	0.2	0.2	0.2	0.1	5

¹ Environmental Protection Organization, (2016); ² Ayers & Westcot (1985); ³ Environmental Protection Agency (2012)

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی خاک‌های مورد استفاده

Table 2. Physico-chemical properties of soils

پارامتر Parameter	بافت خاک Soil texture	pH	EC (ds/m)	ماده آلی (%) Organic matter (%)	N (%)	P (mg/kg)	K (mg/kg)	
خاک ۱ Soil 1	لومی-رسی Clay Loam	7.9	1.4	0.95	0.07	32	202	
خاک ۲ Soil 2	لومی-رسی Clay Loam	8	1.61	1.23	0.11	50	256	
مقدار متوسط جهانی World-soil average ¹	-	-	-	-	-	-	-	
پارامتر Parameter		Fe (g/kg)	Zn (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Pb (mg/kg)
خاک ۱ Soil 1		17.93	78.10	36.30	322.13	22.10	33.13	20.78
خاک ۲ Soil 2		28.42	183.32	146.72	981.40	41.81	88.10	48.01
مقدار متوسط جهانی World-soil average ¹		-	70	38.9	488	29	59.5	27

¹ Kabata-Pendias (2011) خاک ۱: خاک شاهد؛ خاک ۲: خاک آبیاری شده با پساب شهری؛
Soil 1: Control soil; Soil 2: Soil irrigated with municipal effluent

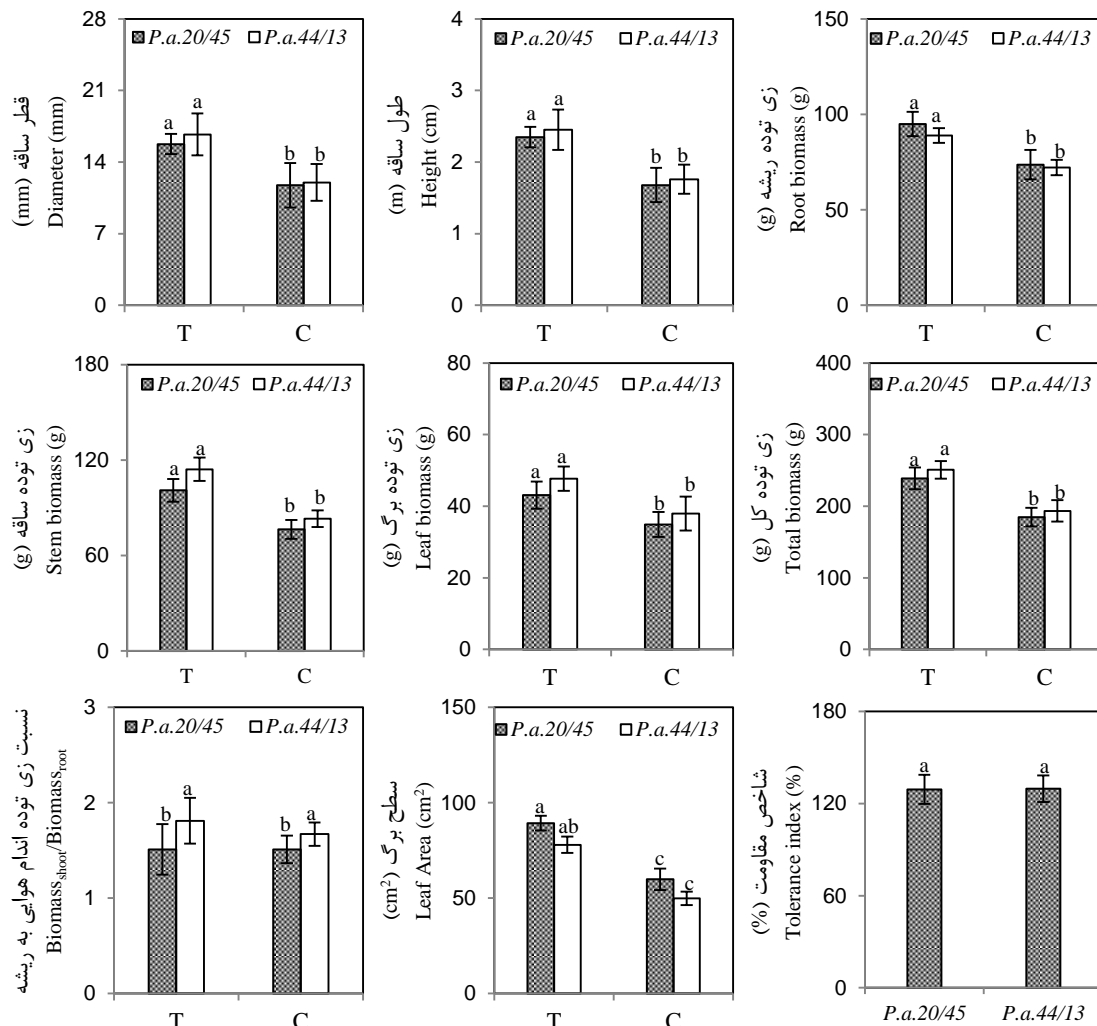
جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس (ANOVA) تیمارهای خاک و کلن و اثرهای متقابل آنها بر ویژگی‌های رویشی

Table 3. Analyses of variance (ANOVA) of soil and clone treatments and their interactions on growth parameters

منابع تغییرات Source of Variation	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean square			
		قطر ساقه (mm) Diameter (mm)	طول ساقه (cm) Height (cm)	زی توده ریشه (g) Root biomass (g)	زی توده ساقه (g) Stem biomass (g)
خاک (A) Soil (A)	1	65.85*	13940.08**	1085.66**	1837.68**
کلن (B) Clone (B)	1	20.25	252.08	41.14	309.08
A×B	1	0.244	0.750	14.96	111.71
خطا Error	8	8.08	891.50	29.76	39.38

منابع تغییرات Source of Variation	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean square			
		زی توده برگ (g) Leaf biomass (g)	زی توده کل (g) Total biomass (g)	نسبت زی توده اندام هوایی به ریشه Biomass _{shoot} /Biomass _{root}	سطح برگ (cm ²) Leaf Area (cm ²)
خاک (A) Soil (A)	1	237.63**	8323.44**	0.001	2470.20**
کلن (B) Clone (B)	1	44.93	89.21	0.012*	214.01
A×B	1	1.88	154.08	0.009	1.30
خطا Error	8	10.41	52.10	0.002	15.72

* معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵ درصد، ** معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۹ درصد
Significant differences are indicated with * $P < 0.05$ and ** $P < 0.01$



شکل ۱- ویژگی‌های رویشی دو کلن صنوبر کبوده رشد کرده در خاک متأثر از پساب شهری (T) و شاهد (C) (میانگین \pm SE)؛ حروف انگلیسی متفاوت، تفاوت معنی‌دار آماری بین میانگین گروه‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد.

Figure 1. Growth parameters of two poplar clones of *P. alba* grown in soil affected by municipal effluent (T) and control (C) (mean \pm SE); Different letters indicate significant differences.

دو کلن صنوبر کبوده اختلاف معنی‌دار آماری نشان ندادند، اما تأثیر کلن بر جذب و تجمع فلز آهن در ریشه، فلز روی در ریشه و ساقه و فلز منگنز در ریشه، ساقه و برگ معنی‌دار بود. به طوری که پس از گذشت دو فصل رویش، بیشترین غلظت آهن در ریشه و روی و منگنز در ریشه و ساقه در کلن *P. alba* 20/45 و بیشترین غلظت منگنز در برگ در کلن *P. alba* 44/13 مشاهده شد. البته تأثیر متقابل تیمارهای خاک و کلن بر جذب و تجمع عناصر غذایی در اندام‌های گیاهی معنی‌دار نبود (جدول‌های ۴ و ۵).

غلظت عناصر غذایی اصلی و کم‌مصرف در اندام‌های گیاهی

پس از دو فصل رویش، در هر دو کلن صنوبر کبوده، افزایش معنی‌دار ($P < 0.01$) جذب و تجمع عناصر غذایی اصلی شامل نیتروژن (N)، فسفر (P) و پتاسیم (K) و عناصر غذایی کم‌مصرف شامل آهن (Fe)، روی (Zn)، مس (Cu) و منگنز (Mn) در ریشه و اندام هوایی نهال‌های تیمار شده با خاک متأثر از پساب شهری در مقایسه با نهال‌های شاهد مشاهده شد. از نظر غلظت عناصر NPK اندام‌های گیاهی،

جدول ۴- غلظت عناصر غذایی اصلی در اندام‌های گیاهی نهال‌های دو کلن صنوبر کبوده رشد کرده در خاک متأثر از پساب شهری (T) و خاک شاهد (C) (میانگین \pm SE)

Table 4. The concentration of macro nutrients in plant tissues of two poplar clones of *P. alba* grown in soil affected by municipal effluent (T) and control (C) (mean \pm SE)

کلن Clone	<i>P. alba</i> 20/45		<i>P. alba</i> 44/13		خاک (A)	کلن (B)	A \times B	
	T	C	T	C	Soil (A)	Clone (B)		
تیمارها Treatments					<i>P</i> values			
N (%)	ریشه Root	1.15 \pm 0.12 ^a	0.78 \pm 0.05 ^b	1.10 \pm 0.11 ^a	0.70 \pm 0.07 ^b	0.000**	0.554	0.918
	ساقه Stem	0.84 \pm 0.03 ^a	0.57 \pm 0.02 ^b	0.90 \pm 0.02 ^a	0.65 \pm 0.03 ^b	0.000**	0.125	0.332
	برگ Leaf	2.16 \pm 0.06 ^a	1.59 \pm 0.06 ^b	2.27 \pm 0.03 ^a	1.63 \pm 0.04 ^b	0.000**	0.652	0.441
P (%)	ریشه Root	0.24 \pm 0.03 ^a	0.17 \pm 0.02 ^b	0.25 \pm 0.02 ^a	0.17 \pm 0.03 ^b	0.000**	0.356	0.558
	ساقه Stem	0.23 \pm 0.03 ^a	0.16 \pm 0.01 ^b	0.25 \pm 0.01 ^a	0.19 \pm 0.01 ^b	0.000**	0.635	0.550
	برگ Leaf	0.28 \pm 0.01 ^a	0.18 \pm 0.01 ^b	0.27 \pm 0.03 ^a	0.19 \pm 0.01 ^b	0.000**	0.452	0.509
K (%)	ریشه Root	1.11 \pm 0.12 ^a	0.80 \pm 0.05 ^b	1.19 \pm 0.11 ^a	0.87 \pm 0.07 ^b	0.000**	0.222	0.436
	ساقه Stem	0.93 \pm 0.08 ^a	0.78 \pm 0.03 ^b	0.93 \pm 0.07 ^a	0.76 \pm 0.04 ^b	0.000**	0.450	0.658
	برگ Leaf	1.05 \pm 0.12 ^a	0.80 \pm 0.05 ^b	1.12 \pm 0.11 ^a	0.84 \pm 0.06 ^b	0.000**	0.513	0.441

C: خاک شاهد؛ T: خاک آبیاری شده با پساب شهری؛ **: معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۹ درصد؛ در هر ردیف حروف انگلیسی متفاوت، تفاوت معنی‌دار آماری بین میانگین گروه‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد.

C: Control soil; T: Soil irrigated with municipal effluent; Significant differences are indicated with ** $P < 0.01$; Different letters indicate significant differences.

غلظت فلزات سنگین در اندام‌های گیاهی

پس از دو فصل رویش، غلظت فلزات سنگین نیکل کروم (Cr) و سرب (Pb) در اندام‌های گیاهی نهال‌های هر دو کلن صنوبر کبوده در تیمار خاک متأثر از پساب شهری افزایش معنی‌داری ($P < 0.01$) را نسبت به مقادیر مشابه آن در نهال‌های تیمار شاهد نشان داد. تأثیر کلن بر

جذب و تجمع فلز نیکل در ریشه، ساقه و برگ و فلزات کروم و سرب در ریشه معنی‌دار بود. به‌طوری‌که بیشترین مقادیر در نهال‌های *P. alba* 20/45 تیمار شده با خاک متأثر از پساب شهری مشاهده شد. البته تأثیر متقابل تیمارهای خاک و کلن بر غلظت فلزات سنگین در ریشه و اندام هوایی معنی‌دار نبود (جدول ۶ و شکل ۲).

جدول ۵- غلظت عناصر غذایی کم مصرف در اندام‌های گیاهی نهال‌های دو کلن صنوبر کیوده رشد کرده در خاک متأثر از پساب شهری (T) و خاک شاهد (C) (میانگین \pm SE)

Table 5. The concentration of micro nutrients in plant tissues of two poplar clones of *P. alba* grown in soil affected by municipal effluent (T) and control (C) (mean \pm SE)

کلن Clone	تیمارها Treatments	<i>P. alba</i> 20/45		<i>P. alba</i> 44/13		خاک (A) Soil (A)	کلن (B) Clone (B)	A \times B
		T	C	T	C	<i>P values</i>		
Fe (mg/kg)	ریشه Root	948.47 \pm 58.70 ^a	612.29 \pm 59.08 ^c	804.61 \pm 44.9 ^b	565.48 \pm 41.16 ^c	0.000**	0.008**	0.112
	ساقه Stem	145.75 \pm 24.28 ^{ab}	92.57 \pm 16.76 ^c	159.64 \pm 24.07 ^a	98.42 \pm 11.41 ^c	0.001**	0.379	0.714
	برگ Leaf	542.59 \pm 50.10 ^a	295.9 \pm 45.60 ^c	501.19 \pm 58.07 ^{ab}	332.24 \pm 36.10 ^c	0.001**	0.950	0.347
Zn (mg/kg)	ریشه Root	220.92 \pm 23.01 ^a	121.28 \pm 15.43 ^c	163.48 \pm 14.93 ^b	107.28 \pm 12.02 ^c	0.000**	0.016*	0.969
	ساقه Stem	188.82 \pm 18.40 ^a	123.45 \pm 10.86 ^{bc}	138.88 \pm 18.97 ^b	100.93 \pm 9.89 ^c	0.001**	0.008**	0.225
	برگ Leaf	349.77 \pm 13.25 ^a	219.93 \pm 24.01 ^b	335.93 \pm 23.70 ^a	219.79 \pm 24.50 ^b	0.003**	0.820	0.824
Cu (mg/kg)	ریشه Root	12.30 \pm 0.78 ^a	8.10 \pm 0.60 ^b	11.84 \pm 1.23 ^a	8.26 \pm 0.57 ^b	0.000**	0.766	0.541
	ساقه Stem	10.32 \pm 0.45 ^a	7.91 \pm 0.52 ^b	10.66 \pm 0.59 ^a	7.41 \pm 0.79 ^b	0.000**	0.824	0.244
	برگ Leaf	11.19 \pm 0.49 ^a	8.30 \pm 0.69 ^b	10.92 \pm 0.70 ^a	7.83 \pm 0.58 ^b	0.000**	0.186	0.700
Mn (mg/kg)	ریشه Root	126.63 \pm 11.23 ^a	96.21 \pm 8.55 ^c	104.31 \pm 7.72 ^b	81.34 \pm 6.89 ^c	0.000**	0.012*	0.534
	ساقه Stem	93.06 \pm 5.49 ^a	65.54 \pm 6.67 ^c	78.13 \pm 6.50 ^b	54.40 \pm 5.68 ^c	0.000**	0.003**	0.556
	برگ Leaf	120.07 \pm 18.06 ^b	89.73 \pm 11.43 ^c	156.67 \pm 7.79 ^a	100.56 \pm 9.21 ^{bc}	0.000**	0.008**	0.095

C: خاک شاهد؛ T: خاک آبیاری شده با پساب شهری؛ *: معنی داری در سطح اطمینان ۹۵ درصد، **: معنی داری در سطح اطمینان ۹۹ درصد؛ در هر ردیف، حروف انگلیسی متفاوت تفاوت معنی دار آماری را بین میانگین گروه‌های مورد بررسی نشان می‌دهد.

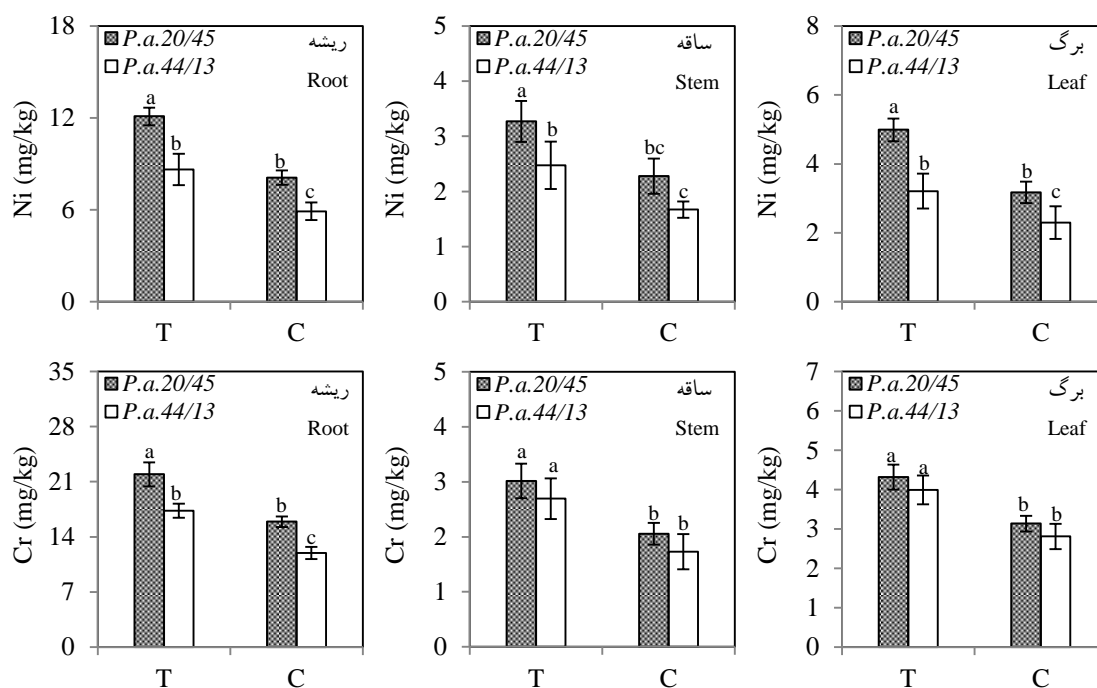
C: Control soil; T: Soil irrigated with municipal effluent; Significant differences are indicated with * $P < 0.05$ and ** $P < 0.01$; Different letters indicate significant differences.

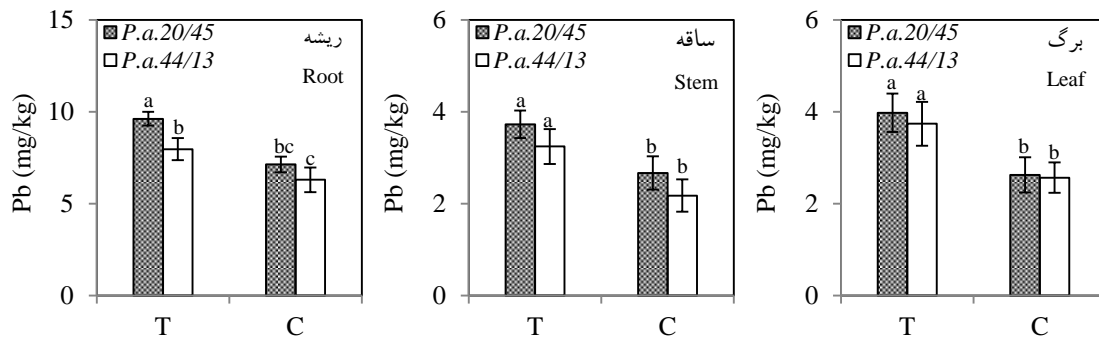
جدول ۶- نتایج تجزیه واریانس (ANOVA) تیمارهای خاک و کلن و اثرهای متقابل آنها بر غلظت فلزات سنگین در اندام‌های گیاهی

Table 6. Analyses of variance (ANOVA) of soil and clone treatments and their interactions on concentration of heavy metals in plant tissues

منابع تغییرات Source of Variation	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean square								
		Ni (mg/kg)			Cr (mg/kg)			Pb (mg/kg)		
		ریشه Root	ساقه Stem	برگ Leaf	ریشه Root	ساقه Stem	برگ Leaf	ریشه Root	ساقه Stem	برگ Leaf
خاک (A) Soil (A)	۱	34.03**	2.42**	5.60**	97.12**	2.77**	4.18**	7.14**	2.94*	3.75**
کلن (B) Clone (B)	۱	24.05**	1.47**	5.28**	55.12**	0.317	0.317	3.78**	0.963	0.261
A×B	۱	1.22	0.027	0.617	0.314	0.141	0.121	0.875	0.019	0.161
خطا Error	۸	3.58	0.113	0.184	0.847	0.095	0.94	0.250	0.282	0.148

*: معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵ درصد؛ **: معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۹ درصد
Significant differences are indicated with * $P < 0.05$ and ** $P < 0.01$





شکل ۲- غلظت فلزات سنگین در ریشه و اندام هوایی نهال‌های دو کلن صنوبر کبوده رشد کرده در خاک متأثر از پساب شهری (T) و شاهد (C) (میانگین \pm SE)؛ حروف انگلیسی متفاوت تفاوت معنی دار آماری را بین میانگین گروه‌های مورد بررسی نشان می‌دهد.

Figure 2. The concentration of heavy metals in plant tissues of two poplar clones of *P. alba* grown in soil affected by municipal effluent (T) and control (C) (mean \pm SE); Different letters indicate significant differences.

2013). در همین راستا و مطابق با نتایج این پژوهش در گزارش‌های متعدد نیز به افزایش رشد و زی‌توده گونه‌های درختی مانند *P. euramericana* (Tsakou et al., 2003)، *Dalbergia* (Egiarte et al., 2005)، *Pinus radiata* (Guo et al., 2006)، *Eucalyptus* sp. (Singh & Bhati, 2005)، *sissoo* (Salehi et al., 2008)، *Pinus eldarica* (et al., 2006)، *Olea europaea* (Aghabarati et al., 2008)، *pseudoacacia* (Tabari & Salehi, 2009) و *Kh. senegalensis* (Ali et al., 2013) و *P. nigra* (Salehi et al., 2021) آبیاری شده با پساب در مقایسه با گیاهان آبیاری شده با آب معمولی اشاره شده است.

نتایج نشان داد، شاخص مقاومت گیاه که یکی از فاکتورهای مهم بررسی گیاه در بستر آلوده به فلزات سنگین می‌باشد (Umebese & Motajo, 2008)، در دو کلن صنوبر کبوده بالای ۱۰۰ درصد بود و دو کلن از نظر این شاخص تفاوت معنی دار آماری نشان ندادند. مطالعات پیشین نشان داده است که شاخص مقاومت بالای ۷۰ درصد در صنوبرها و بیدها نشان‌دهنده مقاومت خوب و قابل توجه گیاه در بستر آلوده می‌باشد (Landberg & Greger, 2002; Borghi et al., 2008). بنابراین می‌توان گفت دو کلن صنوبر کبوده مورد مطالعه جزء کلن‌های صنوبر مقاوم در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین هستند.

پس از دو فصل رویش، در هر دو کلن صنوبر کبوده،

بحث

رشدونمو محصولات کشاورزی در خاک‌های متأثر از پساب‌های شهری زمینه ورود آلاینده‌های متعدد به زنجیره غذایی انسان را فراهم می‌کند. در مقابل، کاشت گونه‌های درختی غیرمثمر با اهداف چندمنظوره در این خاک‌ها می‌تواند به‌عنوان یک گزینه مناسب مورد توجه قرار گیرد. بنابراین، پژوهش پیش‌رو با هدف بررسی عملکرد دو کلن صنوبر کبوده در خاک متأثر از پساب شهری انجام شد. نتایج نشان داد، پس از دو فصل رویش، در هر دو کلن صنوبر افزایش معنی دار ($P < 0.01$) پارامترهای رشد و زی‌توده در نهال‌های تیمار شده با خاک آبیاری شده با پساب شهری در مقایسه با نهال‌های شاهد مشاهده شد. اما دو کلن صنوبر تفاوت معنی‌داری را از نظر ویژگی‌های رویشی نشان ندادند. به‌طور معمول پساب‌های شهری یک منبع غنی از عناصر غذایی و مواد آلی هستند و می‌توانند برای آبیاری محصولات و به‌ویژه درختان مورد استفاده قرار گیرند. تأثیر مثبت آبیاری با پساب‌های شهری بر ویژگی‌های رویشی گونه‌های درختی حکایت از غنی بودن پساب از عناصر غذایی مورد نیاز گیاه دارد (Białowiec et al., 2007; Zalesny & Bauer, 2007; Zalesny et al., 2009) که در نتیجه آبیاری خاک با پساب‌های شهری، بهبود ویژگی‌های خاک و به‌دنبال آن بهبود سازوکارهای فیزیولوژیکی و رشد گیاه اتفاق خواهد افتاد (Egiarte et al., 2005; Ali et al., 2005).

افزایش معنی‌دار ($P < 0/01$) جذب و تجمع عناصر غذایی اصلی و کم‌مصرف در اندام‌های نهال‌های صنوبر رشد کرده در خاک آبیاری شده با پساب شهری در مقایسه با نهال‌های شاهد مشاهده شد. تأثیر کلن بر تجمع برخی از عناصر غذایی کم‌مصرف مانند آهن، روی و منگنز در برخی از اندام‌های گیاهی معنی‌دار بود و به‌طور کلی بیشترین مقادیر در کلن *P. alba* 20/45 دیده شد. افزایش جذب و غلظت عناصر غذایی در اندام‌های گیاهی نهال‌های آبیاری شده با پساب شهری به دلیل اضافه شدن مداوم عناصر غذایی به خاک از طریق پساب شهری غنی از عناصر غذایی می‌باشد (Ali et al., 2013). مطابق با گزارش Bozkurt و Yarılgil (۲۰۰۳)، جذب عناصر غذایی توسط گیاهان به مقدار آنها در آب و خاک، ویژگی‌های خاک و نوع گیاه وابسته است. از آنجایی‌که عناصر غذایی بسیاری از ترکیبات مهم متابولیسم گیاه را تشکیل داده و نقش حیاتی و مهمی در عملکردهای فیزیولوژیکی گیاه ایفا می‌کنند، افزایش جذب و غلظت عناصر غذایی در اندام‌های گیاه، عامل اصلی افزایش سطح برگ، ارتفاع گیاه و تولید زی‌توده خشک در گیاهان متأثر از آبیاری با پساب‌های شهری می‌باشد (Marschner, 1995). در گزارش‌های متعدد نیز به افزایش جذب و تجمع عناصر غذایی در گونه‌های درختی متأثر از پساب‌های شهری اشاره شده است (Patterson et al., 2008; Ali et al., 2021; Salehi et al., 2013). الگوی رفتاری نهال‌های دو ساله دو کلن صنوبر کبوده در تجمع عناصر غذایی کم‌مصرف در اندام‌های گیاهی مشابه بود. به‌طوری‌که در هر دو کلن، بیشترین جذب و تجمع عناصر آهن و مس به ترتیب در ریشه، برگ و ساقه و عناصر روی و منگنز به ترتیب در برگ، ریشه و ساقه مشاهده شد. مطابق با نتایج به‌دست آمده، Laureysens و همکاران (۲۰۰۴)، Lei و همکاران (۲۰۰۷)، Unterbrunner و همکاران (۲۰۰۷) و Lingua و همکاران (۲۰۰۸) نیز در مطالعات خود نشان دادند که در گونه‌های مختلف صنوبر عناصر روی و منگنز اغلب در اندام هوایی به‌ویژه برگ تجمع پیدا می‌کنند. در مقابل، محققان دیگر مانند Kopponen و همکاران (۲۰۰۱)، Todeschini و همکاران (۲۰۰۷) و Baldantoni و همکاران (۲۰۱۴) تجمع بیشتر عناصر آهن و مس را در اندام ریشه گزارش کردند. پس از دو فصل رویش در هر دو کلن صنوبر کبوده، غلظت فلزات سنگین در اندام‌های گیاهی نهال‌های آبیاری شده با پساب شهری در مقایسه با نهال‌های شاهد به‌طور معنی‌داری ($P < 0/01$) بیشتر بود. تجمع بیشتر فلزات سنگین در اندام‌های گیاهی گونه‌های درختی رشد کرده در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین و یا آبیاری شده با پساب توسط محققان دیگر نیز با بررسی گونه‌های درختی مانند *Kh. senegalensis* (Ali et al., 2013)، *P. alba* و *P. nigra* (Baldantoni et al., 2014)، *P. euramericana* (Chandra & Kang, 2016) و *P. nigra* از سه کلن از *P. nigra* (Salehi et al., 2021) گزارش شده است. دو کلن صنوبر کبوده از نظر جذب و تجمع فلز نیکل در ریشه، ساقه و برگ و فلزات کروم و سرب در ریشه تفاوت‌های معنی‌داری ($P < 0/01$) را نشان دادند، به‌طوری‌که بیشترین مقادیر در نهال‌های *P. alba* 20/45 تیمار شده با خاک متأثر از پساب شهری مشاهده شد. مطابق با نتایج این پژوهش، Zalesny و Bauer (۲۰۰۷) با ارزیابی چندین کلن از گونه‌های مختلف صنوبر و بید آبیاری شده با پساب نشان دادند که میزان جذب و تجمع برای اغلب عناصر مورد بررسی تحت تأثیر ژنوتیپ‌های گیاهی بود. در هر دو کلن صنوبر، بیشترین جذب و تجمع فلزات سنگین در اندام ریشه و کمترین مقدار در اندام ساقه مشاهده شد. به‌طور کلی، در اغلب گونه‌های درختی، توزیع اغلب فلزات در میان اندام‌های گیاهی به‌صورت ریشه < برگ < ساقه گزارش شده است (Shi et al., 2011; Baldantoni et al., 2014). تجمع بیشتر فلزات سنگین در اندام زیرزمینی و انتقال کمتر آن به اندام‌های هوایی از جمله سازوکارهایی است که گیاهان برای حفاظت از اندام‌های متابولیسمی در مقابله با سمیت فلزات سنگین در بسترهای رشد اتخاذ می‌کنند (Sankar Ganesh et al., 2006).

افزایش معنی‌دار ($P < 0/01$) جذب و تجمع عناصر غذایی اصلی و کم‌مصرف در اندام‌های نهال‌های صنوبر رشد کرده در خاک آبیاری شده با پساب شهری در مقایسه با نهال‌های شاهد مشاهده شد. تأثیر کلن بر تجمع برخی از عناصر غذایی کم‌مصرف مانند آهن، روی و منگنز در برخی از اندام‌های گیاهی معنی‌دار بود و به‌طور کلی بیشترین مقادیر در کلن *P. alba* 20/45 دیده شد. افزایش جذب و غلظت عناصر غذایی در اندام‌های گیاهی نهال‌های آبیاری شده با پساب شهری به دلیل اضافه شدن مداوم عناصر غذایی به خاک از طریق پساب شهری غنی از عناصر غذایی می‌باشد (Ali et al., 2013). مطابق با گزارش Bozkurt و Yarılgil (۲۰۰۳)، جذب عناصر غذایی توسط گیاهان به مقدار آنها در آب و خاک، ویژگی‌های خاک و نوع گیاه وابسته است. از آنجایی‌که عناصر غذایی بسیاری از ترکیبات مهم متابولیسم گیاه را تشکیل داده و نقش حیاتی و مهمی در عملکردهای فیزیولوژیکی گیاه ایفا می‌کنند، افزایش جذب و غلظت عناصر غذایی در اندام‌های گیاه، عامل اصلی افزایش سطح برگ، ارتفاع گیاه و تولید زی‌توده خشک در گیاهان متأثر از آبیاری با پساب‌های شهری می‌باشد (Marschner, 1995). در گزارش‌های متعدد نیز به افزایش جذب و تجمع عناصر غذایی در گونه‌های درختی متأثر از پساب‌های شهری اشاره شده است (Patterson et al., 2008; Ali et al., 2021; Salehi et al., 2013). الگوی رفتاری نهال‌های دو ساله دو کلن صنوبر کبوده در تجمع عناصر غذایی کم‌مصرف در اندام‌های گیاهی مشابه بود. به‌طوری‌که در هر دو کلن، بیشترین جذب و تجمع عناصر آهن و مس به ترتیب در ریشه، برگ و ساقه و عناصر روی و منگنز به ترتیب در برگ، ریشه و ساقه مشاهده شد. مطابق با نتایج به‌دست آمده، Laureysens و همکاران (۲۰۰۴)، Lei و همکاران (۲۰۰۷)، Unterbrunner و همکاران (۲۰۰۷) و Lingua و همکاران (۲۰۰۸) نیز در مطالعات خود نشان دادند که در گونه‌های مختلف صنوبر عناصر روی و منگنز اغلب در اندام هوایی به‌ویژه برگ تجمع پیدا می‌کنند. در مقابل، محققان دیگر مانند Kopponen و همکاران (۲۰۰۱)، Todeschini و همکاران (۲۰۰۷) و Baldantoni و همکاران (۲۰۱۴) تجمع بیشتر عناصر آهن و مس را در اندام ریشه گزارش کردند. پس از دو فصل رویش در هر دو کلن صنوبر کبوده، غلظت فلزات سنگین در اندام‌های گیاهی نهال‌های آبیاری شده با پساب شهری در مقایسه با نهال‌های شاهد به‌طور معنی‌داری ($P < 0/01$) بیشتر بود. تجمع بیشتر فلزات سنگین در اندام‌های گیاهی گونه‌های درختی رشد کرده در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین و یا آبیاری شده با پساب توسط محققان دیگر نیز با بررسی گونه‌های درختی مانند *Kh. senegalensis* (Ali et al., 2013)، *P. alba* و *P. nigra* (Baldantoni et al., 2014)، *P. euramericana* (Chandra & Kang, 2016) و *P. nigra* از سه کلن از *P. nigra* (Salehi et al., 2021) گزارش شده است. دو کلن صنوبر کبوده از نظر جذب و تجمع فلز نیکل در ریشه، ساقه و برگ و فلزات کروم و سرب در ریشه تفاوت‌های معنی‌داری ($P < 0/01$) را نشان دادند، به‌طوری‌که بیشترین مقادیر در نهال‌های *P. alba* 20/45 تیمار شده با خاک متأثر از پساب شهری مشاهده شد. مطابق با نتایج این پژوهش، Zalesny و Bauer (۲۰۰۷) با ارزیابی چندین کلن از گونه‌های مختلف صنوبر و بید آبیاری شده با پساب نشان دادند که میزان جذب و تجمع برای اغلب عناصر مورد بررسی تحت تأثیر ژنوتیپ‌های گیاهی بود. در هر دو کلن صنوبر، بیشترین جذب و تجمع فلزات سنگین در اندام ریشه و کمترین مقدار در اندام ساقه مشاهده شد. به‌طور کلی، در اغلب گونه‌های درختی، توزیع اغلب فلزات در میان اندام‌های گیاهی به‌صورت ریشه < برگ < ساقه گزارش شده است (Shi et al., 2011; Baldantoni et al., 2014). تجمع بیشتر فلزات سنگین در اندام زیرزمینی و انتقال کمتر آن به اندام‌های هوایی از جمله سازوکارهایی است که گیاهان برای حفاظت از اندام‌های متابولیسمی در مقابله با سمیت فلزات سنگین در بسترهای رشد اتخاذ می‌کنند (Sankar Ganesh et al., 2006).

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که پس از گذشت دو فصل رویش، آبیاری با پساب شهری تأثیر مثبتی بر رشد و تولید زی‌توده نهال‌های دو کلن صنوبر کبوده (*P. alba* 20/45) و *P. alba* 44/13 در نتیجه غنی شدن خاک با عناصر غذایی مهم و ضروری داشت. بنابراین، پساب شهری می‌تواند به‌عنوان یک منبع آبی متناوب برای آبیاری با قابلیت افزایش سطح عناصر غذایی خاک به‌ویژه در جنگل‌کاری‌ها و زراعت چوب که خطر مشکلات سلامتی و محیط‌زیستی کمتر است، مورد توجه قرار گیرد. مقایسه عملکرد دو کلن صنوبر نیز نشان داد که نهال‌های دو کلن از نظر رشد و تولید زی‌توده تفاوت معنی‌داری نداشتند، اما نهال‌های کلن *P. alba* 20/45 مقادیر بیشتری از عناصر غذایی کم‌مصرف و فلزات سنگین را در اندام‌های گیاهی خود جمع کردند که این موضوع نشان می‌دهد این کلن از قابلیت گیاه‌پالایی بهتری برخوردار است. در پایان، ذکر این نکته حائز اهمیت است که استفاده از پساب‌های شهری در هر حالتی باید با رعایت مسائل محیط‌زیستی انجام شود.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله مراتب تشکر و قدردانی خود را از بنیاد ملی نخبگان و مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور بابت حمایت مالی از پژوهش انجام شده، اعلام می‌دارند.

منابع مورد استفاده

- Ayers, R.S. and Westcot, D.W., 1985. Water Quality for Agriculture. FAO Irrigation and Drainage, Paper No. 29, Rome, Italy, 176p.
- Baldantoni, D., Ciatelli, A., Bellino, A. and Castiglione, S., 2014. Different behaviours in phytoremediation capacity of two heavy metal tolerant poplar clones in relation to iron and other trace elements. *Journal of Environmental Management*, 146: 94-99.
- Białowiec, A., Wojnowsky-Baryła, I. and Agopsowicz, M., 2007. The efficiency of evapotranspiration of landfill leachate in the soil-plant system with *Salix amygdala* L. *Ecological Engineering*, 30: 356-361.
- Borghini, 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.
- Bouyoucos, G.J., 1962. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agronomy Journal*, 54(5): 464-465.
- Bozkurt, M.A. and Yarılgil, T., 2003. The effects of sewage sludge applications on the yield, growth, nutrition and heavy metal accumulation in apple trees growing in dry conditions. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 27(5): 285-292.
- Bremner, J.M., 1996. Nitrogen-total. In: Sparks, D.L., et al., (Eds.). *Methods of Soil Analysis, Part 3: Chemical Methods*. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, pp. 1085-1122.
- Chandra, R. and Kang, H., 2016. Mixed heavy metal stress on photosynthesis, transpiration rate, and chlorophyll content in poplar hybrids. *Forest Science and Technology*, 12(2): 55-61.
- Dimitriou, I. and Aronsson, P., 2011. Wastewater and sewage sludge application to willows and poplars grown in lysimeter-Plant response and treatment efficiency. *Biomass and Bioenergy*, 35(1): 161-170.
- Egiarte, G., Camps Arbertain, M., Alonso, A., Ruíz-Romera, E. and Pinto, M., 2005. Effect of repeated applications of sewage sludge on the fate of N in soils under monterey pine stands. *Forest Ecology and Management*, 216(1-3): 257-269.
- Environmental Protection Agency: Washington, DC, USA, 2012. Guidelines for Water Reuse 600/R-12/618.
- Environmental Protection Organization, 2016. Iranian water quality standard, 14p.
- French, C.J., Dickinson, N.M. and Putwain, P.D., 2006. Woody biomass phytoremediation of contaminated brownfield land. *Environmental Pollution*, 141: 387-395.
- Goliński, P., Mleczek, M., Magdziak, Z., Gąsecka, M., Borowiak, K., Dąbrowski, J., Kaczmarek, Z. and Rutkowski, P., 2015. Efficiency of Zn phytoextraction, biomass yield and formation of
- Aghabarati, A., Hosseini, S.M., Esmaeili, A. and Maralian, H., 2008. Growth and mineral accumulation in *Olea europaea* L. trees irrigated with municipal effluent. *Research Journal of Environmental Science*, 2(4): 281-290.
- Ali, H.M., Siddiqui, M.H., Khamis, M.H., Hassan, F.A., Salem, M.Z.M. and El-Mahrouk, E.S.M., 2013. Performance of forest tree *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. under sewage effluent irrigation. *Ecological Engineering*, 61(A): 117-126.
- Aryal, N. and Reinhold, D.M., 2015. Reduction of metal leaching by poplars during soil treatment of wastewaters: Small-scale proof of concept studies. *Ecological Engineering*, 78: 53-61.

- Nelson, D.W. and Sommers, L.E., 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Sparks, D.L., et al., (Eds.). *Methods of Soil Analysis, Part 3: Chemical Methods*. Soil Science Society of America, Inc., American Society of Agronomy, Inc., Madison, Wisconsin, pp. 961-1010.
- Olsen, S.R., Cole, C.V., Watanabe, F.S. and Deen, L.A., 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. *Circular Vol. 939, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.*, 19p.
- Page, A.L., 1982. *Methods of Soil Analysis, Part 2: Chemical and Microbiological Properties, Second Edition*. American Society of Agronomy, Inc., Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin, 1159p.
- Patterson, S.J., Chanasyk, D.S., Naeth, M.A. and Mapfumo, E., 2008. Effect of municipal and pulp mill effluents on the chemical properties and nutrient status of a coarse-textured Brunisol in a growth chamber. *Canadian Journal of Soil Science*, 88: 429-441.
- Pilipović, A., Zalesny, R.S., Rončević, S., Nikolić, N., Orlović, S., Beljinc, J. and Katanić, M., 2019. Growth, physiology, and phytoextraction potential of poplar and willow established in soils amended with heavy-metal contaminated, dredged river sediments. *Journal of Environmental Management*, 239: 352-365.
- Rhoades, J.D., 1982. Soluble salts. In: Page, A.L. (Ed.). *Methods of Soil Analysis, Part 2: Chemical and Microbiological Properties, Second Edition*. American Society of Agronomy, Inc., Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin, pp. 167-179.
- Robinson, B.H., Green, S.R., Chancerel, B., Mills, T.M. and Clothier, B.E., 2007. Poplar for the phytomanagement of boron contaminated sites. *Environmental Pollution*, 150: 225-233.
- Salehi, A., 2020. Strategic approach to the use of unconventional waters in agricultural lands south of Tehran. *Journal of Iran Nature*, 5(5): 23-29 (In Persian).
- Salehi, A., Calagari, M. and Ahmadloo, F., 2021. Effect of soil and water affected by municipal effluent on performance one-year old plants of three black poplar (*Populus nigra* L.) clones. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 29(2): 114-127.
- Salehi, A., Tabari, M., Mohammadi, J. and Aliarab, A., 2008. Effect of irrigation with municipal effluent on soil and growth of *Pinus eldarica* Medw. trees. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 16(2): 186-196 (In Persian).
- Sankar Ganesh, K., Sundaramoorthy, P. and Chidambaram, A.L.A., 2006. Chromium toxicity low-molecular-weight organic acids in *Syrubens-a* hydroponic experiment. *Chemistry and Ecology*, 31: 345-364.
- Guo, L.B., Sims, R.E.H. and Horne, D.J., 2006. Biomass production and nutrient cycling in *Eucalyptus* short rotation energy forests in New Zealand: II. Litter fall and nutrient return. *Biomass and Bioenergy*, 30(5): 393-404.
- Kabata-Pendias, A., 2011. *Trace Elements in Soils and Plants*, 4th edition. CRC Press, Boca Raton, 548P.
- Kopponen, P., Utriainen, M., Lukkari, K., Suntioinen, S., Ka`renlampi, L. and Ka`renlampi, S., 2001. Clonal differences in copper and zinc tolerance of birch in metal-supplemented soils. *Environmental Pollution*, 112: 89-97.
- Landberg, T. and Greger, M., 2002. Differences in oxidative stress in heavy metal resistant and sensitive clones of *Salix viminalis*. *Journal of Plant Physiology*, 159: 69-75.
- Laureysens, I., Blust, R., Temmerman, L., Lemmens, C. and Ceulemans, R., 2004. Clonal variation in heavy metal accumulation and biomass production in a poplar coppice culture: I. Seasonal variation in leaf, wood and bark concentrations. *Environmental Pollution*, 131: 485-494.
- Lei, Y., Chen, K., Tian, X., Korpelainen, H. and Li, C., 2007. Effect of Mn toxicity on morphological and physiological changes in two *Populus cathayana* populations originating from different habitats. *Trees*, 21: 569-580.
- Lingua, G., Franchin, C., Todeschini, V., Castiglione, S., Biondi, S., Burlando, B., Parravicini, V., Torrigiani, P. and Berta, G., 2008. Arbuscular mycorrhizal fungi differentially affect the response to high zinc concentrations of two registered poplar clones. *Environmental Pollution*, 153: 147-157.
- Marschner, H., 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plants*, 2nd ed. Academic Press, London, 889P.
- Mataruga, Z., Jarić, S., Marković M., Pavlović, M., Pavlović, D., Jakovljević, K., Mitrović, M. and Pavlović, P., 2020. Evaluation of *Salix alba*, *Juglans regia* and *Populus nigra* as biomonitors of PTEs in the riparian soils of the Sava River. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, 131.
- Mclean, E.O., 1982. Soil pH and lime requirement. In: Page, A.L. (Ed.). *Methods of Soil Analysis, Part 2: Chemical and Microbiological Properties, Second Edition*. Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin, PP. 199-224.
- Mleczeek, M., Rutkowski, P., Kaniuczak, J., Szostek, M., Budka, A., Magdziak, Z., Budzyńska, S., Kuczyńska-Kippen, N. and Niedzielski, P., 2019. The significance of selected tree species age in their efficiency in elements phytoextraction from wastes mixture. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16: 3579-3594.

- Toxicology, 71: 330-337.
- Tzanakakis, V.A., Paranychianakis, N.V. and Angelakis, A.N., 2009. Nutrient removal and biomass production in land treatment systems receiving domestic effluent. *Ecological engineering*, 35: 1485-1492.
- Umebese, C.E. and Motajo, A.F., 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.
- Unterbrunner, R., Puschenreiter, M., Sommer, P., Wieshammer, G., Tlustos, P., Zupan, M. and Wenzel, W.W., 2007. Heavy metal accumulation in trees growing on contaminated sites in Central Europe. *Environmental Pollution*, 148: 107-114.
- Zalesny Jr.R.S., Wiese, A.H., Bauer, E.O. and Riemenschneider, D.E., 2009. Ex situ growth and biomass of *Populus* bioenergy crops irrigated and fertilized with landfill leachate. *Biomass and Bioenergy* 33(1): 62-69.
- Zalesny, Jr.R.S. and Bauer, E.O., 2007. Evaluation of *Populus* and *Salix* continuously irrigated with landfill leachate I. Genotype-specific elemental phytoremediation. *International Journal of Phytoremediation*, 9: 281-306.
- effect on blackgram, soybean and paddy. *Pollution Research*, 25(4): 257-261.
- Shi, X., Zhang, X., Chen, G., Chen, Y., Wang, L. and Shan, X., 2011. Seedling growth and metal accumulation of selected woody species in copper and lead/zinc mine tailings. *Journal of Environmental Sciences*, 23(2): 266-274.
- Singh, G. and Bhati, M., 2005. Growth of *Dalbergia sissoo* in desert regions of western India using municipal effluent and the subsequent changes in soil and plant chemistry. *Bioresource Technology*, 96(9): 1019-1028.
- Tabari, M. and Salehi, A., 2009. Long-term impact of municipal sewage irrigation on treated soil and black locust trees in a semi-arid suburban area of Iran. *Journal of Environmental Sciences*, 21(10): 1438-1445.
- Todeschini, V., Franchin, C., Castiglione, S., Burlando, B., Biondi, S., Torrigiani, P., Berta, G. and Lingua, G., 2007. Responses of two registered poplar clones to copper, after inoculation, or not, with arbuscular mycorrhizal fungi. *Caryologia*, 60: 146-155.
- Tsakou, A., Rouli, M. and Christodoulaki, N.S., 2003. Growth parameters and heavy metal accumulation in poplar tree cultures (*Populus euramericana*) utilizing water and sludge from a sewage treatment plant. *Bulletin of Environmental Contamination and*

Growth and heavy metal uptake in two-year old plants of two clones from *Populus alba* in soil irrigated with municipal effluent

A. Salehi^{1*}, F. Ahmadloo² and R. Bagheri³

1* - Corresponding author, Assistant Prof., Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran E-mail: az.salehi@rifr-ac.ir

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

3- Research Expert, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

Received: 29.10.2021

Accepted: 06.12.2021

Abstract

This study was carried out to study the performance of two-year old plants from two *Populus alba* clones in soil irrigated by municipal effluent. For this purpose, a pot experiment was done in a completely randomized design with two factors: 1) soil in two levels of irrigations and 2) two clones of poplar. In both poplar clones, after two growth seasons, significant increase of growth properties, leaf area, biomass and uptake and accumulation of micro and macro nutrients and also heavy metals in organs (root, stem and leaf) of plants irrigated by municipal effluent were observed compared to plants of control treatment. In both poplar clones, the highest uptake and accumulation of Fe, Cu, Ni, Cr and Pb were measured in the roots and Zn and Mn in the leaves. After two growth seasons, the two poplar clones did not demonstrate significant differences in terms of growth and biomass parameters, however the effect of clone on uptake and accumulation of micro nutrients and heavy metals in plant organs was significant. The highest amounts of most micronutrients and heavy metals were determined in plants of *P. alba* 20/45 treated by municipal effluent. Tolerance Index of both poplar clones in soil affected by municipal effluent after two growth seasons was above 100% and the effect of clone on this Index was not significant. Due to the good performance of two-year-old plants of *P. alba* in soil irrigated by municipal effluent, these poplar clones can be considered for wood farming in soil under municipal effluent irrigation.

Keywords: Contaminated soil, Phytoremediation, *Populus alba*, wastewater, wood farming.