مجلهٔ جنگل ایران، انجمن جنگلبانی ایران
سال چهاردهم، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۴۰۱
ص ۱۳۳-۱۱۹
مقاله پژوهشی

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22034/ijf.2022.284216.1781
شناسه دیجیتال (DOR): 20.1001.1.20086113.1401.14.2.2.0

بررسی عملکرد دو کلن صنوبر کبودهٔ رشدیافته در خاک آلوده به فلزات سنگین تحت آبیاری با فاضلاب شهری

آزاده صالحی[1*]، فاطمه احمدلو[1]

[1] استادیار پژوهشی، مؤسسهٔ تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، ترویج و آموزش کشاورزی، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۱۵)

چکیده

در این پژوهش تأثیر آبیاری با فاضلاب شهری بر عملکرد دو کلن صنوبر کبوده پس از گذشت یک دورهٔ رویش بررسی شد. آزمایش به‌صورت آزمون فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو فاکتور خاک متأثر از نوع آبیاری در دو سطح و کلن صنوبر در دو سطح انجام گرفت. پس از یک دورهٔ رویش، در هر دو کلن صنوبر کبوده، تیمار نهال‌ها با خاک آبیاری‌شده با فاضلاب شهری افزایش معنی‌دار ($P \leq$ ۰/۰۱) پارامترهای رشد و تولید زی‌توده را به‌همراه داشت و بیشترین مقادیر در کلن *Populus alba* L. 44/13 مشاهده شد. همچنین در هر دو کلن صنوبر، رشد نهال‌ها در خاک آبیاری‌شده با فاضلاب شهری، افزایش معنی‌دار ($P \leq$ ۰/۰۱) غلظت عناصر غذایی و فلزات سنگین در ریشه و اندام هوایی را نسبت به نهال‌های شاهد در پی داشت. در هر دو کلن صنوبر، بیشترین جذب و تجمع عناصر آهن، مس، نیکل، کروم و سرب در ریشه و روی و منگنز در برگ بود. تأثیر کلن بر جذب و تجمع اغلب عناصر غذایی کم‌مصرف و فلزات سنگین معنی‌دار ($P \leq$ ۰/۰۵) بود. به‌طور کلی نهال‌های کلن *P. alba* 20/45 مقادیر بیشتری از عناصر غذایی کم‌مصرف و فلزات سنگین را در اندام‌های گیاهی خود تجمع دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که پس از یک دورهٔ رویش، کلن *P. alba 44/13* از عملکرد رشد و تولید زی‌تودهٔ بهتر و کلن *P. alba* 20/45 از پتانسیل جذب و تجمع بیشتر فلزات سنگین در اندام‌های گیاهی برخوردار بود. در کل، با توجه به عملکرد مناسب دو کلن صنوبر کبودهٔ بررسی‌شده، این دو کلن را می‌توان برای زراعت چوب در اراضی متأثر از فاضلاب شهری در نظر گرفت.

واژه‌های کلیدی: رشد، زراعت چوب، زی‌توده، صنوبر کبوده (*Populus alba*)، فاضلاب شهری.

مقدمه

ازآنجا که بیشتر فعالیت‌های انجام‌گرفته با آب به تولید فاضلاب منجر می‌شود، همواره منابع آب بالقوه‌ای وجود دارد که می‌توان از آنها در موارد مجاز استفاده کرد. استفاده از فاضلاب در آبیاری راهکاری برای کاهش فشار بر منابع آب شیرین به شمار می‌رود (Toze, 2006 ؛ Houda et al., 2016). کشت محصولات کشاورزی در اراضی متأثر از فاضلاب ممکن است سبب ورود آلاینده‌های متعدد فیزیکی، شیمیایی و میکروبی به زنجیرهٔ غذایی انسان شود. در مقابل کاشت گونه‌های درختی چوبده با اهداف چندمنظوره در این اراضی گزینهٔ مناسبی به‌شمار می‌رود. در صورت محقق شدن این امر، از یک طرف می‌توان برای مدیریت و استفادهٔ بهینه از فاضلاب تولیدی با رعایت مسائل محیط زیستی گام برداشت و از طرف دیگر با توجه به نقش مثبت فاضلاب‌ها به‌مثابهٔ منبع تأمین آب و منبع مغذی از عناصر غذایی ضمن تولید چوب به اهداف دیگری مانند حفظ خاک و توسعهٔ

*نویسندهٔ مسئول شمارهٔ تماس: ۰۹۱۲۸۳۵۵۶۶۲ ایمیل: az.salehi@rifr-ac.ir

فضای سبز نیز رسید (Salehi, 2020). همچنین با توجه به اینکه برخی گونه‌های درختی به‌ویژه گونه‌های تندرشد متعلق به خانوادهٔ بیدیان شامل صنوبرها و بیدها از توانایی پالایش گیاهی مناسبی برخوردارند (Mleczek et al., 2019; Mataruga et al., 2020; Goliński et al., 2015)، با کاشت گونه‌های درختی در اراضی تحت آبیاری با فاضلاب، فرایند گیاه‌پالایی خاک نیز از طریق جذب و تجمع فلزات سنگین در اندام‌های گیاهی صورت خواهد گرفت (Miguel et al., 2014; Baldantoni et al., 2014; Pilipović etal., 2019).

مرور پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که بیشتر گونه‌های درختی قابلیت کشت در اراضی متأثر از فاضلاب را بدون ایجاد اختلال جدی در فرایند رشد گیاه دارند. اما بی‌گمان باید گونه‌هایی مدنظر قرار گیرند که توان رشد و تولید زی‌تودهٔ بیشتر و پتانسیل گیاه‌پالایی بهتری داشته باشند. از آن جمله می‌توان به نتایج پژوهش‌های Salehi et al. (2008) در درختان کاج تهران، Aghabarati et al. (2008) در درختان زیتون و Tabari & Salehi (2009) در درختان اقاقیا اشاره کرد. در هر سه پژوهش، گزارش شد که درختان آبیاری‌شده با فاضلاب شهری در مقایسه با آب معمولی رشد بهتر و مناسب‌تری داشتند. Aryal & Reinhold (2015) نیز با بررسی نوعی صنوبر هیبرید نشان دادند که آبیاری با فاضلاب تأثیر منفی بر پارامترهای رشد صنوبر ندارد و افزون‌بر آن، صنوبر بررسی‌شده توانایی جذب و تجمع فلزات سنگین در اندام‌های گیاهی را دارا بود. در تحقیقات دیگری نظیر Ali et al. (2013) (با بررسی گونهٔ درختی *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss.) و Dimitriou & Aronsson (2011) (با بررسی چند گونه صنوبر و بید) نیز به افزایش رشد گونه‌های درختی آبیاری‌شده با فاضلاب اشاره شده است.

با توجه به اهمیت مدیریت فاضلاب‌های تولیدی در کلانشهرها و استفاده از آنها با رعایت مسائل محیط زیستی از یک سو و تحقیقات اندک داخلی در زمینهٔ عملکرد گونه‌های درختی چوبده در اراضی متأثر از فاضلاب از سوی دیگر، در این پژوهش عملکرد رشد و تولید زی‌توده، جذب و تجمع عناصر غذایی و فلزات سنگین در اندام‌های گیاهی دو کلن صنوبر کبوده (*P. alba*) شامل *P. alba 20/45* و *P. alba 44/13* پس از یک دورهٔ رویش در خاک تحت آبیاری با فاضلاب بررسی شد.

مواد و روش‌ها

منطقهٔ پژوهش

خاک آلودهٔ استفاده‌شده در این پژوهش از اراضی کشاورزی جنوب شهر تهران که سالیان متمادی متأثر از فاضلاب شهری بوده است و خاک معمولی از ایستگاه تحقیقاتی البرز مؤسسهٔ تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور تهیه شد. گلدان‌های پلاستیکی (با ابعاد ۲۵×۲۰ سانتی‌متر و حجم تقریبی ۷/۵ لیتر یا کیلوگرم) با خاک‌های جمع‌آوری‌شده پر شدند. در ابتدا سه نمونه خاک برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی برداشت شد. فاضلاب به‌کاررفته در این پژوهش رواناب سطحی جاری در جنوب شهر تهران است. این رواناب سطحی ترکیبی از آوردهای کوهستانی و شهری و بخشی از فاضلاب‌های مسکونی و صنعتی است و در ردهٔ فاضلاب‌های خام و بدون تصفیه قرار می‌گیرد (Salehi, 2020). در طول پژوهش، فاضلاب مورد نیاز به‌طور پیوسته از جنوب شهر تهران به محل اجرای پژوهش (ایستگاه تحقیقاتی البرز) منتقل شد. از فاضلاب استفاده‌شده در پژوهش در زمان‌های مختلف برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی نمونه‌برداری شد. در این پژوهش از دو کلن صنوبر کبوده استفاده شد. این دو کلن جزء کلن‌های پربازده‌اند و در طی آزمایش‌های سازگاری متعدد توسط محققان مؤسسهٔ تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، توان زیاد تولید چوب و سازگاری آنها با مناطق نیمه‌خشک کشور به اثبات رسیده است.

شیوۀ اجرای پژوهش

به‌طور کلی، پژوهش حاضر به‌صورت آزمون فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو فاکتور: ۱. خاک متأثر از نوع آبیاری در دو سطح (خاک آبیاری‌شده با آب معمولی (شاهد) و خاک آبیاری‌شده با فاضلاب)؛ و ۲. کلن صنوبر در دو سطح (*P. alba 20/45* و *P. alba 44/13*)، در کل با چهار تیمار انجام گرفت. بدین منظور در اواسط اسفندماه قلمه‌های همگن (از نظر قطر و ارتفاع قلمه) دو کلن صنوبر کبوده (به‌ازای هر تیمار پنج قلمه در سه تکرار و در کل شصت گلدان برای چهار تیمار) در گلدان‌های آماده کاشته شد و گلدان‌ها تا پایان پژوهش در فضای باز مسقف نگهداری شدند. آبیاری گلدان‌های پرشده با خاک متأثر از فاضلاب با فاضلاب شهری جمع‌آوری‌شده و آبیاری گلدان‌های پرشده با خاک معمولی با آب معمولی دو بار در هفته به‌صورت کاملاً یکسان از نظر مقدار آب برای همۀ گلدان‌ها در طول پژوهش انجام گرفت.

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 (ICP-PerkinElmer MS: Elan 9000 DRC-E, USA) اندازه‌گیری شد. بافت خاک به روش هیدرومتری (Bouyoucos, 1962)، اسیدیتۀ خاک (pH) به روش گل اشباع (Mclean,1982)، هدایت الکتریکی (EC) به روش عصارۀ گل اشباع (Rhoades, 1982)، مادۀ آلی به روش والکلی- بلاک (Nelson & Sommers, 1996)، نیتروژن کل به روش کجلدال (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) در اندام‌های گیاهی نیز پس از هضم اسیدی نمونه‌ها (با استفاده از اسیدهای HCl و HNO_3 به نسبت ۳ به ۱) در دستگاه هضم مایکروویو (Multiwave 3000, Anton Paar, GmbH, Austria)، با استفاده از دستگاه ICP-MS (PerkinElmer ICP-MS: Elan 9000 DRC-E, USA) اندازه‌گیری شد. حد تشخیص دستگاه ICP-MS برای فلزات آهن و منگنز ۰/۱ میلی‌گرم در لیتر و برای دیگر فلزات ۰/۰۵ میلی‌گرم در لیتر بود. در این پژوهش، به‌منظور کنترل کیفیت آزمایش و ارزیابی صحت داده‌های عناصر و فلزات سنگین اندازه‌گیری‌شده از مادۀ مرجع تأییدشده CRM059-Trace Metals-Loamy Clay 2 (Sigma-Aldrich, USA) استفاده شد. مقدار بازیابی فلزات سنگین نمونۀ مرجع در مقایسه با مقادیر تأییدشده آن بین ۹۸/۵-۹۲/۴ درصد بود.

پس از یک دورۀ رویش، پارامترهای رشد (قطر و طول ساقه) و تولید زی‌توده (ریشه، ساقه و برگ) با انتخاب تصادفی چهار نهال به ازای هر تیمار اندازه‌گیری شد. برای تعیین زی‌توده، پس از شست‌وشوی نهال، اندام‌های مختلف (ریشه، ساقه و برگ) از هم جدا شدند و پس از خشک شدن اندام‌های گیاهی در دستگاه آون به‌مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۲ درجۀ سانتی‌گراد وزن خشک اندام‌ها تعیین شد. در هر نهال انتخابی، پارامتر سطح برگ با اندازه‌گیری سطح برگ سه برگ کاملاً توسعه‌یافته از بالاترین قسمت هر نهال با استفاده از دستگاه سطح برگ‌سنج (Leaf Area Meter: Gate House, Model 4cht Aok) تعیین شد. همچنین نمونه‌های گیاهی (ریشه، ساقه و برگ) از نظر عناصر غذایی و فلزات سنگین بررسی شد. در نمونه‌های گیاهی، نیتروژن به روش کجلدال (Bremner, 1996)، فسفر به روش اولسن (Olsen et al., 1954) و پتاسیم به روش استات آمونیوم نرمال (Page et al., 1982) اندازه‌گیری شد. غلظت عناصر غذایی کم‌مصرف (آهن، روی، منگنز و مس) و فلزات سنگین (نیکل، کروم و سرب) در اندام‌های گیاهی نیز پس از هضم اسیدی نمونه‌ها (با استفاده از اسیدهای HCl و HNO_3 به

نسبت ۳ به ۱) در دستگاه هضم مایکروویو (Multiwave 3000, Anton Paar, GmbH, Austria)، با استفاده از دستگاه ICP-MS (PerkinElmer ICP-MS: Elan 9000 DRC-E, USA) تعیین شد. حد تشخیص دستگاه ICP-MS برای فلزات آهن و منگنز ۰/۱ میلی‌گرم در لیتر و برای فلزات دیگر ۰/۰۵ میلی‌گرم در لیتر بود. در این پژوهش، به‌منظور کنترل کیفیت آزمایش و ارزیابی صحت داده‌های عناصر و فلزات سنگین اندازه‌گیری‌شده در نمونه‌های گیاهی از دو مادهٔ مرجع تأییدشده GSB-11- Citrus leaves (NCS ZC73018, China National Analysis Centre for Iron and Steel) و CD281- Rey Grass (Institute for Reference Materials and Measurements, European Commission) استفاده شد. مقدار بازیابی فلزات سنگین نمونه‌های مرجع در مقایسه با مقادیر تأییدشدهٔ آن بین ۹۹/۷-۹۰/۴ درصد بود.

روش تحلیل

تجزیه‌وتحلیل داده‌های پژوهش حاضر با نرم‌افزار آماری SPSS انجام گرفت. برای این کار در ابتدا توسط آزمون‌های شاپیرو- ویلک و لون، نرمال بودن و همگنی واریانس داده‌ها بررسی شد. سپس با توجه به نرمال و همگن بودن داده‌ها، برای بررسی تأثیر تیمارهای خاک و کلن و همچنین تأثیر متقابل این دو تیمار بر پارامترهای رشد و تولید زی‌توده، جذب و تجمع عناصر غذایی و فلزات سنگین در اندام‌های گیاهی از آزمون تجزیهٔ واریانس دوطرفه (آنووا) و برای گروه‌بندی و مقایسه میانگین‌ها از آزمون توکی استفاده شد.

نتایج

ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی فاضلاب و خاک

مقایسهٔ ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی فاضلاب به‌کاررفته در این پژوهش با استانداردهای FAO، EPA و سازمان محیط زیست ایران نشان داد که به‌طور کلی این آب از نظر pH، EC، غلظت عناصر غذایی و فلزات سنگین در محدودهٔ مجاز آب آبیاری است (جدول ۱). در جدول ۲ ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی خاک‌های استفاده‌شده آورده شده است. براساس مقادیر ذکرشده در جدول ۲، سطح فلزات سنگین موجود در خاک متأثر از فاضلاب از مقادیر متوسط جهانی فلزات در خاک بیشتر است.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی فاضلاب استفاده‌شده

پارامتر	فاضلاب	سازمان محیط زیست	FAO	US EPA
		mg/l		
pH	۷/۱۳	۶/۵-۸/۴	۶-۸/۵	۶/۵-۸/۴
EC (ds/m)	۱/۱۲	۳	۰-۳	۰/۷-۳
N (mg/l)	۲۴/۹۲	۳۰	۰-۱۵	۵-۳۰
P (mg/l)	۱/۹۶	-	۰-۲	۰/۰۴-۰/۴
K (mg/l)	۱۲/۴	-	-	۱۰-۲۰
Ca (mg/l)	۶۴/۶	-	-	۴۰-۷۰
Mg (mg/l)	۹/۲۲	-	-	۵-۲۰
Na (mg/l)	۸۲/۷	-	-	۹۰-۲۰۰
Fe (µg/l)	۸۰	۵	۵	۵
Zn (µg/l)	۸۸	۲	۲	۲
Cu (µg/l)	۲۶	۰/۲	۰/۲	۰/۲
Mn (µg/l)	۳۰	۰/۲	۰/۲	۰/۲
Ni (µg/l)	۳۰	۰/۲	۰/۲	۰/۲
Cr (µg/l)	۱۵/۹۶	۰/۱	۰/۱	۰/۱
Pb (µg/l)	۹۳	۵	۵	۵

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی خاک‌های استفاده‌شده

ویژگی‌های خاک	خاک معمولی	خاک متأثر از فاضلاب	مقدار متوسط جهانی[1]
بافت خاک	لومی- رسی	لومی- رسی	-
pH	۷/۹	۸	-
EC (ds/m)	۱/۴	۱/۶۱	-
ماده آلی (٪)	۰/۹۵	۱/۲۳	-
(%) N	۰/۰۷	۰/۱۱	-
(mg/kg) P	۳۲	۵۰	-
(mg/kg) K	۲۰۲	۲۵۶	-
(g/kg) Fe	۱۷/۹۳	۲۸/۴۲	-
(mg/kg) Zn	۷۸/۱۰	۱۸۳/۳۲	۷۰
(mg/kg) Cu	۳۶/۳۰	۱۴۶/۷۲	۳۸/۹
(mg/kg) Mn	۳۲۲/۱۳	۹۸۱/۴۰	۴۸۸
(mg/kg) Ni	۲۲/۱۰	۴۱/۸۱	۲۹
(mg/kg) Cr	۳۳/۱۳	۸۸/۱۰	۵۹/۵
(mg/kg) Pb	۲۰/۷۸	۴۸/۰۱	۲۷

[1] Kabata-Pendias, 2011

پارامترهای رشد و تولید زی‌توده

در هر دو کلن صنوبر کبوده، پس از گذشت یک دورهٔ رویش، افزایش معنی‌دار ($P \leq ۰/۰۱$) پارامترهای رشد (قطر و طول ساقه)، تولید زی‌تودهٔ اندام‌های گیاهی (ریشه، ساقه و برگ) و سطح برگ نهال‌های تیمارشده با خاک متأثر از آبیاری با فاضلاب نسبت به نهال‌های تیمار شاهد (خاک آبیاری‌شده با آب معمولی) مشاهده شد. تأثیر کلن نیز بر همهٔ پارامترهای رشد و زی‌تودهٔ تحت بررسی به‌جز قطر ساقه و سطح برگ معنی‌دار ($P \leq ۰/۰۵$) بود، به‌طوری که پس از گذشت یک دورهٔ رویش، بیشترین طول ساقه و تولید زی‌توده در کلن *P. alba 44/13* در تیمار خاک متأثر از فاضلاب مشاهده شد. تأثیر متقابل تیمارهای خاک و کلن بر هیچ یک از پارامترهای تحت بررسی معنی‌دار نبود (جدول ۳ و شکل ۱).

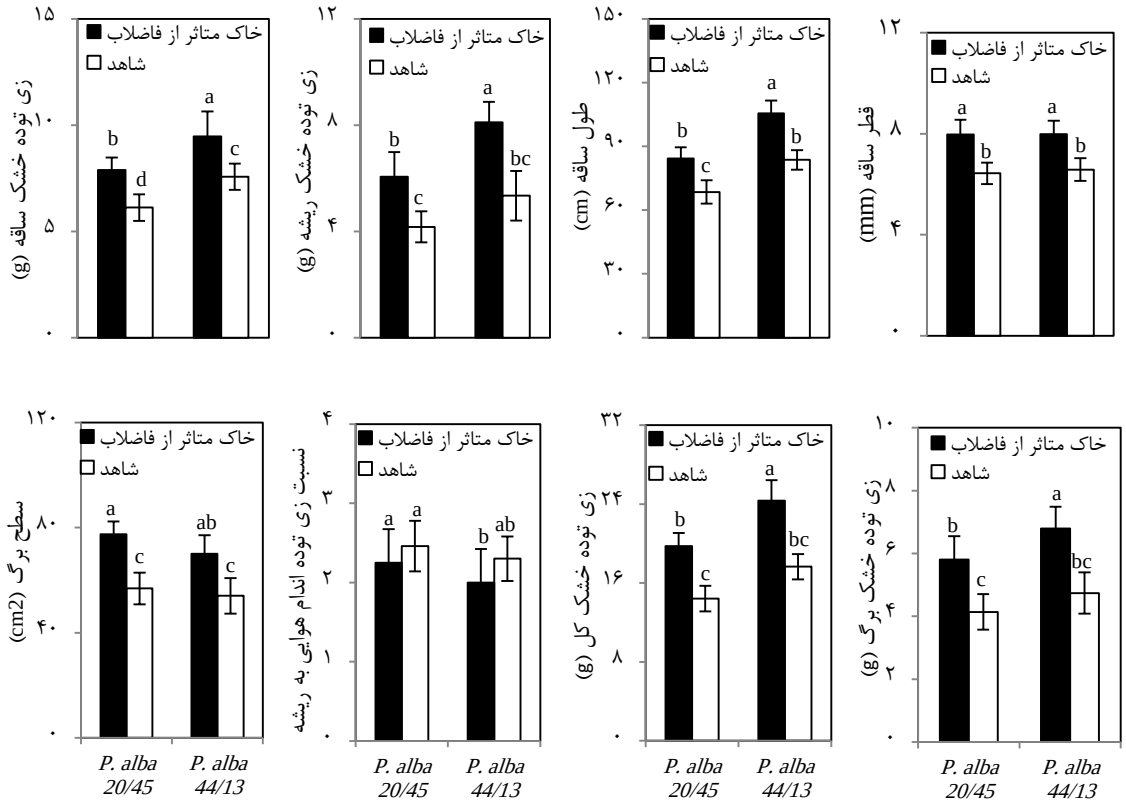
غلظت عناصر غذایی اصلی (NPK) در اندام‌های گیاهی

پس از گذشت یک دورهٔ رویش، در هر دو کلن صنوبر کبوده، افزایش معنی‌دار ($P \leq ۰/۰۱$) غلظت عناصر نیتروژن (N)، فسفر (P) و پتاسیم (K) در ریشه و اندام هوایی نهال‌های تیمارشده با خاک متأثر از آبیاری با فاضلاب در مقایسه با نهال‌های تیمار شاهد مشاهده شد. تأثیر کلن و تأثیر متقابل تیمارهای خاک و کلن بر غلظت عناصر NPK اندام‌های گیاهی معنی‌دار نبود (جدول ۴).

جدول ۳- نتایج تجزیهٔ واریانس (آنووا) تیمارهای خاک و کلن و اثرهای متقابل آنها بر پارامترهای رشد و زی‌توده

تیمار		قطر ساقه (mm)	طول ساقه (cm)	زی‌تودهٔ خشک ریشه (g)	زی‌تودهٔ خشک ساقه (g)	زی‌تودهٔ خشک برگ (g)	زی‌تودهٔ خشک کل (g)	نسبت اندام هوایی به ریشه	سطح برگ (cm^2)
خاک (A)	*P values*	۰/۰۰۰**	۰/۰۰۰**	۰/۰۰۰**	۰/۰۰۳**	۰/۰۰۰**	۰/۰۰۰**	۰/۱۵۹^{ns}	۰/۰۰۲**
کلن (B)		۰/۷۱۹^{ns}	۰/۰۲*	۰/۰۰۳**	۰/۰۱۷*	۰/۰۴۴*	۰/۰۳۲*	۰/۰۳*	۰/۰۵۵^{ns}
A×B		۰/۷۷۴^{ns}	۰/۷۳۵^{ns}	۰/۱۳۹^{ns}	۰/۴۳۹^{ns}	۰/۴۸۲^{ns}	۰/۵۳۳^{ns}	۰/۲۷۹^{ns}	۰/۱۶۳^{ns}

^{ns}نبود اختلاف معنی‌دار؛ *معنی‌داری در سطح ۰/۰۵؛ **معنی‌داری در سطح ۰/۰۱



شکل ۱- پارامترهای رشد و زی‌تودهٔ دو کلن صنوبر کبودهٔ رشدیافته در خاک متأثر از فاضلاب و شاهد (میانگین ± SD)؛ حروف انگلیسی متفاوت تفاوت معنی‌دار آماری بین میانگین گروه‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۴- غلظت عناصر غذایی اصلی (NPK) اندام‌های گیاهی دو کلن صنوبر رشدیافته در خاک متأثر از فاضلاب و شاهد (میانگین±SD)

		P. alba 44/13		*P. alba 20/45*		*P* values		
		خاک متأثر از فاضلاب	شاهد	خاک متأثر از فاضلاب	شاهد	خاک (A)	کلن (B)	A × B
N (%)	ریشه	۱/۲۶ ±۰/۱۰a	۰/۸۱ ±۰/۰۴b	۱/۲۲ ±۰/۰۸a	۰/۷۶ ±۰/۰۶b	۰/۰۰۰**	۰/۷۷۷ ns	۰/۸۲۵ ns
	ساقه	۰/۸۸ ±۰/۰۵a	۰/۶ ±۰/۰۱b	۰/۹۳ ±۰/۰۷a	۰/۶۶ ±۰/۰۸b	۰/۰۰۰**	۰/۱۷۴ ns	۰/۲۲۵ ns
	برگ	۲/۲۲ ±۰/۰۷a	۱/۷ ±۰/۰۵b	۲/۳۶ ±۰/۰۲a	۱/۷۴ ±۰/۰۴b	۰/۰۰۰**	۰/۶۵۵ ns	۰/۷۰۵ ns
P (%)	ریشه	۰/۲۶ ±۰/۰۵a	۰/۱۹ ±۰/۰۲b	۰/۲۸ ±۰/۰۸a	۰/۱۹ ±۰/۰۳b	۰/۰۰۰**	۰/۴۳۳ ns	۰/۷۲۸ ns
	ساقه	۰/۲۶ ±۰/۰۳a	۰/۱۹ ±۰/۰۲b	۰/۲۸ ±۰/۰۰۸a	۰/۱۸ ±۰/۰۱b	۰/۰۰۰**	۰/۳۵۶ ns	۰/۶۱۵ ns
	برگ	۰/۳ ±۰/۰۱a	۰/۱۹ ±۰/۰۷b	۰/۲۹ ±۰/۰۸a	۰/۲۱ ±۰/۰۳b	۰/۰۰۰**	۰/۵۹۴ ns	۰/۶۵۱ ns
K (%)	ریشه	۱/۲۵ ±۰/۰۸a	۰/۸۸ ±۰/۰۶b	۱/۲۸ ±۰/۰۴a	۰/۹۲ ±۰/۰۷b	۰/۰۰۰**	۰/۳۸۴ ns	۰/۵۵۳ ns
	ساقه	۰/۹۹ ±۰/۰۸a	۰/۸۵ ±۰/۰۶b	۰/۹۷ ±۰/۰۲a	۰/۸۶ ±۰/۰۷b	۰/۰۰۰**	۰/۵۴۴ ns	۰/۶۳۱ ns
	برگ	۱/۲۴ ±۰/۰۵a	۰/۸۵ ±۰/۰۴b	۱/۲۳ ±۰/۰۳a	۰/۹ ±۰/۰۶b	۰/۰۰۰**	۰/۵۷۴ ns	۰/۶۶۶ ns

ns نبود اختلاف معنی‌دار؛ **معنی‌داری در سطح ۰/۰۱؛ در هر ردیف، حروف انگلیسی متفاوت تفاوت معنی‌دار آماری بین میانگین گروه‌های تحت بررسی را نشان می‌دهد

غلظت عناصر غذایی کم‌مصرف (آهن، روی، منگنز و مس) در اندام‌های گیاهی

پس از گذشت یک دورهٔ رویش، در هر دو کلن صنوبر کبوده، افزایش جذب و تجمع عناصر غذایی آهن (Fe)، روی (Zn)، منگنز (Mn) و مس (Cu) در ریشه و اندام هوایی نهال‌های تیمارشده با خاک متأثر از فاضلاب نسبت به نهال‌های تیمار شاهد مشاهده شد. در هر دو کلن صنوبر، بیشترین غلظت عناصر آهن و مس به‌ترتیب

در ریشه، برگ و ساقه و بیشترین غلظت عناصر روی و منگنز در برگ، ریشه و ساقه مشاهده شد. 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 ($P \leq ۰/۰۵$) بود. به‌طوری که پس از یک دورۀ رویش، بیشترین غلظت فلز آهن در ریشه، فلز روی در ریشه و ساقه و فلز منگنز در ریشه و ساقه در کلن *P. alba 20/45* و بیشترین غلظت فلز منگنز در برگ در کلن *P. alba 44/13* مشاهده شد. تأثیر متقابل تیمارهای خاک و کلن بر جذب و تجمع عناصر غذایی کم‌مصرف در ریشه و اندام هوایی معنی‌دار نبود (جدول ۵ و شکل ۲).

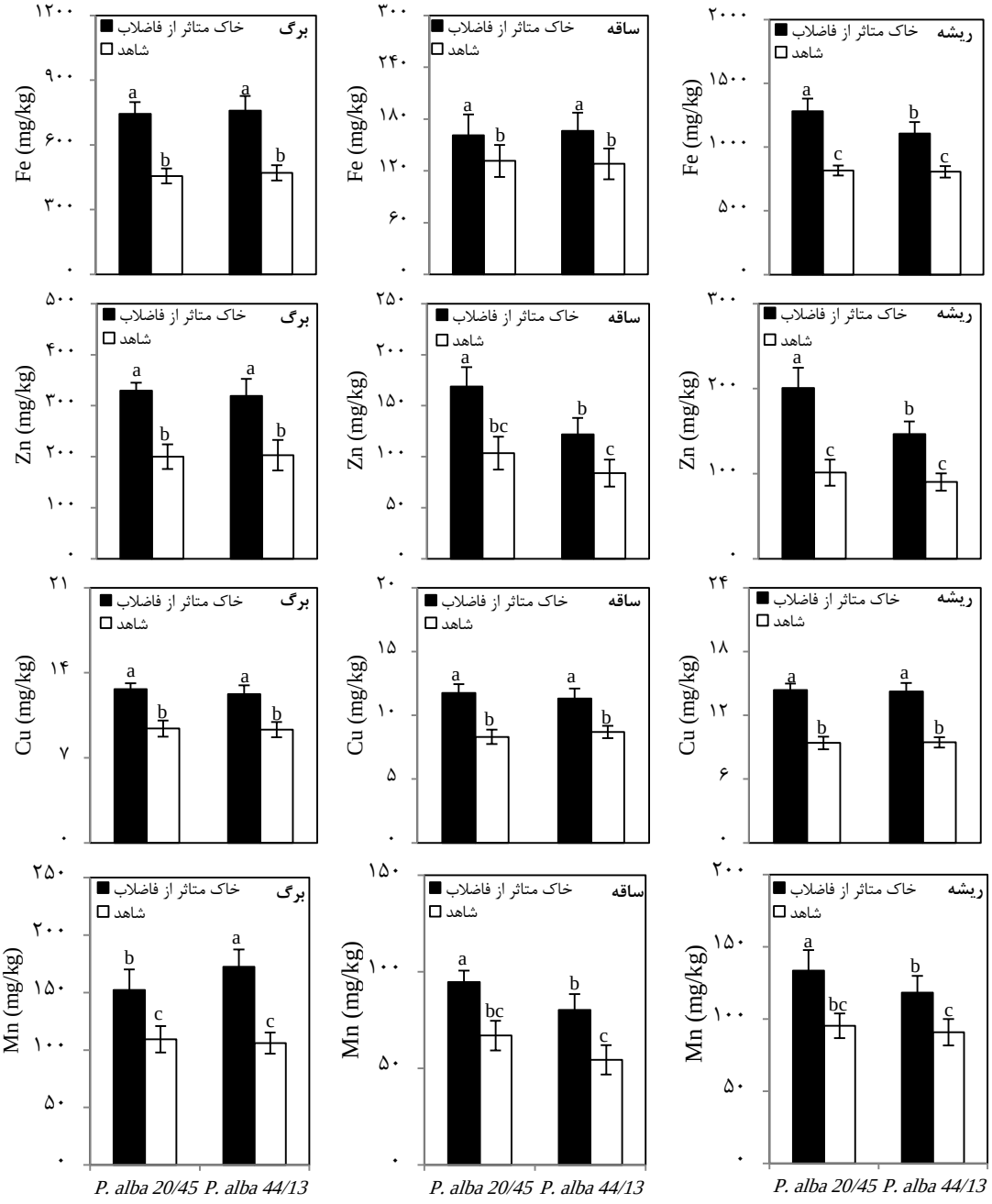
غلظت فلزات سنگین (نیکل، کروم و سرب) در اندام‌های گیاهی

بررسی غلظت فلزات سنگین نیکل (Ni)، کروم (Cr) و سرب (Pb) در اندام‌های گیاهی دو کلن صنوبر کبوده پس از یک دورۀ رویش نشان داد که تیمار خاک متأثر از فاضلاب در هر دو کلن، افزایش جذب و تجمع فلزات سنگین را در ریشه و اندام هوایی در مقایسه با تیمار شاهد در پی داشت. در هر دو کلن صنوبر، بیشترین جذب و تجمع فلزات سنگین در اندام ریشه اتفاق افتاد. تأثیر کلن بر جذب و تجمع فلز نیکل در ریشه، ساقه و برگ، فلز کروم در ریشه و فلز سرب در ریشه و ساقه معنی‌دار ($P \leq ۰/۰۵$) بود و بیشترین مقادیر در کلن *P. alba 20/45* مشاهده شد. تأثیر متقابل تیمارهای خاک و کلن بر غلظت فلزات سنگین در ریشه و اندام هوایی معنی‌دار نبود (جدول ۶ و شکل ۳).

جدول ۵- نتایج تجزیۀ واریانس (ANOVA) تیمارهای خاک و کلن و اثرهای متقابل آنها بر غلظت عناصر غذایی کم‌مصرف در اندام‌های گیاهی

عناصر غذایی کم‌مصرف	اندام‌های گیاه	*P* values		
		خاک (A)	کلن (B)	A × B
Fe (mg/kg)	ریشه	۰/۰۰۰**	۰/۰۲۵*	۰/۰۵۱ns
	ساقه	۰/۰۱۰*	۰/۹۷۲ns	۰/۸۴۴ns
	برگ	۰/۰۰۰**	۰/۲۶۳ns	۰/۹۸۸ns
Zn (mg/kg)	ریشه	۰/۰۰۰**	۰/۰۳۲*	۰/۹۹۸ns
	ساقه	۰/۰۰۱**	۰/۰۱۳*	۰/۲۲۵ns
	برگ	۰/۰۰۳**	۰/۸۹۷ns	۰/۸۲۴ns
Cu (mg/kg)	ریشه	۰/۰۰۰**	۰/۹۰۸ns	۰/۷۹۸ns
	ساقه	۰/۰۰۰**	۰/۹۳۹ns	۰/۲۶۳ns
	برگ	۰/۰۰۰**	۰/۴۶۶ns	۰/۶۳۸ns
Mn (mg/kg)	ریشه	۰/۰۰۱**	۰/۰۰۷**	۰/۳۸۴ns
	ساقه	۰/۰۰۰**	۰/۰۱۳**	۰/۸۳۰ns
	برگ	۰/۰۰۰**	۰/۰۱۰**	۰/۰۷۶ns

ns نبود اختلاف معنی‌دار؛ *معنی‌داری در سطح ۰/۰۵؛ **معنی‌داری در سطح ۰/۰۱

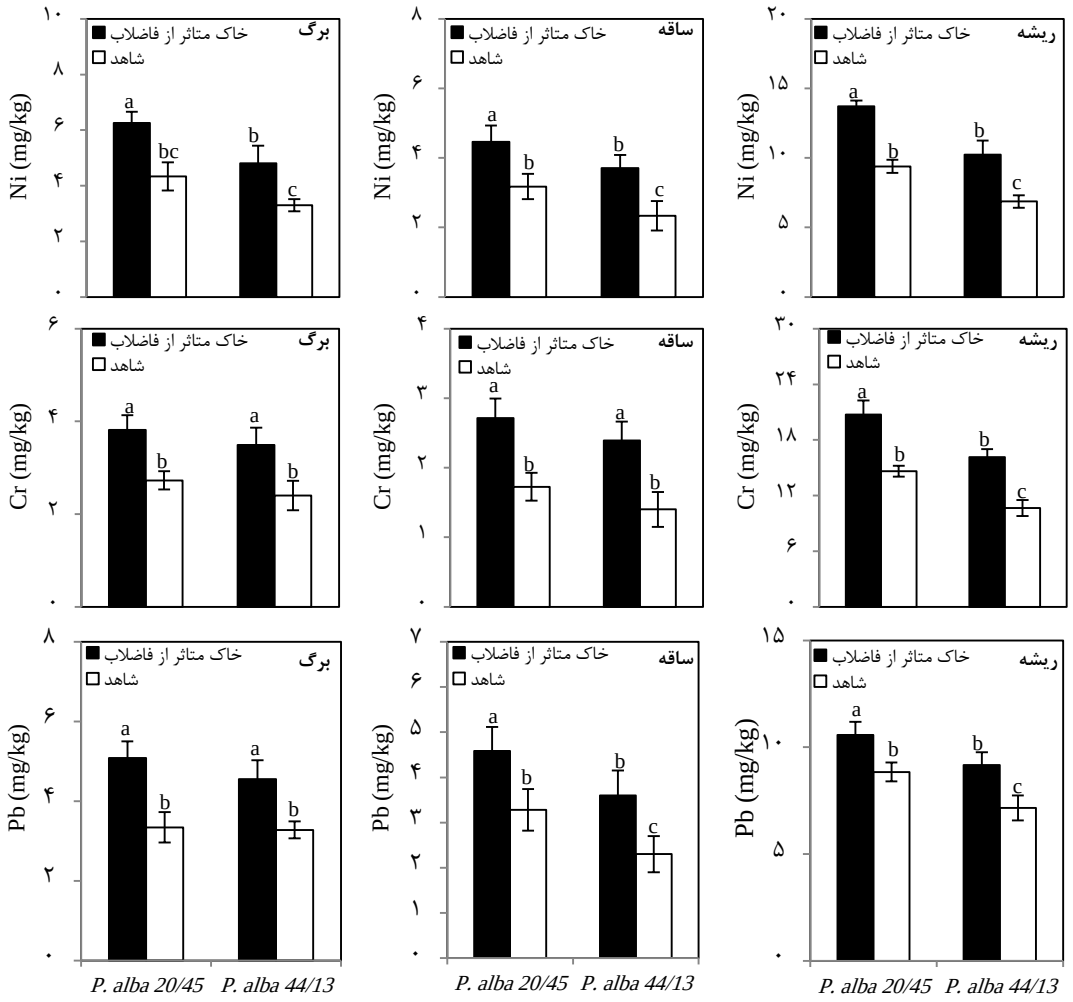


شکل ۲- غلظت عناصر غذایی کم‌مصرف در ریشه و اندام هوایی دو کلن صنوبر کبودهٔ رشدیافته در خاک متأثر از فاضلاب و شاهد (میانگین ± **SD**)؛ حروف انگلیسی متفاوت تفاوت معنی‌دار آماری بین میانگین گروه‌ها را نشان می‌دهد

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

فلزات سنگین		Ni (mg/kg)			Cr (mg/kg)			Pb (mg/kg)		
اندام‌های گیاه		ریشه	ساقه	برگ	ریشه	ساقه	برگ	ریشه	ساقه	برگ
خاک (A)		۰/۰۰۰**	۰/۰۰۰**	۰/۰۰۰**	۰/۰۰۰**	۰/۰۰۱**	۰/۰۰۱**	۰/۰۰۰**	۰/۰۰۷**	۰/۰۰۰**
کلن (B)	*P values*	۰/۰۰۰**	۰/۰۱۰*	۰/۰۰۲**	۰/۰۰۰**	۰/۱۰۴^{ns}	۰/۲۰۶^{ns}	۰/۰۰۱**	۰/۰۲۵*	۰/۲۲۰^{ns}
A×B		۰/۵۱۶^{ns}	۰/۸۵۹^{ns}	۰/۴۷۳^{ns}	۰/۵۶۰^{ns}	۰/۹۹۳^{ns}	۰/۸۹۲^{ns}	۰/۶۳۵^{ns}	۰/۹۵۵^{ns}	۰/۳۲۷^{ns}

^{ns} نبود اختلاف معنی‌دار؛ *معنی‌داری در سطح ۰/۰۵؛ **معنی‌داری در سطح ۰/۰۱



شکل ۳- غلظت فلزات سنگین در ریشه و اندام هوایی دو کلن صنوبر کبودهٔ رشدیافته در خاک متأثر از فاضلاب و شاهد (میانگین ± SD)؛ حروف انگلیسی متفاوت، نشان‌دهندهٔ تفاوت معنی‌دار آماری بین میانگین گروه‌های بررسی‌شده است.

بحث

پژوهش حاضر با هدف بررسی عملکرد دو کلن صنوبر کبوده که از کلن‌های پربازده با توان زیاد تولید چوب در مناطق نیمه‌خشک کشورند، در خاک متأثر از فاضلاب شهری انجام گرفت. پس از گذشت یک دورهٔ رویش، در هر دو کلن صنوبر کبوده، افزایش معنی‌دار ($P \leq ۰/۰۱$) پارامترهای رشد (قطر و طول ساقه)، تولید زی‌تودهٔ اندام گیاهی (ریشه، ساقه و برگ) و سطح برگ نهال‌های تیمارشده با خاک آبیاری‌شده با فاضلاب نسبت به نهال‌های تیمار شاهد (خاک آبیاری‌شده با آب معمولی) مشاهده شد. فاضلاب‌های شهری به‌طور معمول غنی از عناصر غذایی مورد نیاز گیاه است (Yadav et al., 2002؛ Nissim et al., 2015؛Toze, 2006) و ازآنجا که عناصر غذایی موجود در خاک اثر مهمی بر رشد و نمو گیاه دارد (Guo & Sims, 2003)، آبیاری با فاضلاب شهری می‌تواند بهبود خصوصیات خاک (Tzanakakis et al., 2011) و در نتیجه افزایش رشد و بهبود سازوکارهای فیزیولوژیکی گیاه را در پی داشته باشد (Ali et al., 2013؛Egiarte et al., 2005). افزایش رشد و تولید زی‌تودهٔ گونه‌های درختی آبیاری‌شده با فاضلاب در مقایسه با گیاهان آبیاری‌شده با آب معمولی در گزارش‌های متعدد ذکرشده توسط Tsakou et al. (2003) (*P. euramericana* (Dode) Guinier)، Singh & Bhati (2005) (*Dalbergia sissoo* Roxb.ex DC.)،

(*Pinus radiate* D. Don.) Egiarte et al. (2005)، *Eucalyptus botryoides*) Guo et al. (2006) Smith., *E. globulus* Labill. and *E. ovata* (Labill.) و (*Kh. senegalensis*) Ali et al. (2013) شاهد این ادعاست. پژوهش‌های داخلی نیز نشان داده است که آبیاری گونه‌های درختی *P.* Medw. *eldarica* (Salehi et al., 2008)، *Olea europaea* L. (Aghabarati et al., 2008) و *Robinia pseudoacacia* (Tabari & Salehi, 2009) با فاضلاب شهری جاری در جنوب شهر تهران نه‌تنها در رشد درختان خللی وارد نکرد، بلکه درختان آبیاری‌شده با فاضلاب در مقایسه با آب معمولی از افزایش رشد بهتری برخوردار بودند.

با توجه به رشد و تولید زی‌تودهٔ بیشتر نهال‌های رشدیافته در خاک متأثر از فاضلاب، همان‌طور که انتظار می‌رفت، پس از گذشت یک دورهٔ رویش، در هر دو کلن صنوبر کبوده، افزایش معنی‌دار ($P \leq ۰/۰۱$) عناصر غذایی اصلی (NPK) و کم‌مصرف (Fe، Zn، Cu و Mn) در ریشه و اندام هوایی نهال‌های تیمارشده با خاک متأثر از فاضلاب در مقایسه با نهال‌های تیمار شاهد مشاهده شد. مطابق نتایج این پژوهش، Singh et al. (2010) نیز گزارش کردند که کاربرد فاضلاب شهری به‌عنوان آب آبیاری غلظت عناصر غذایی را در نهال‌های *Acacia nilotica* (L.) Willd. Ex. Del.، *D. sissos* و *E. camaldulensis* Dehnh. افزایش داد. Moezzipour et al. (2020) نیز در بررسی خود به افزایش غلظت عناصر غذایی اصلی و کم‌مصرف در اندام هوایی درختان صنوبر و زبان‌گنجشک آبیاری‌شده با شیرابهٔ زباله شهری اشاره کرده‌اند.

پس از یک دورهٔ رویش، در هر دو کلن صنوبر کبوده، افزایش جذب و تجمع فلزات سنگین نیکل، کروم و سرب در ریشه و اندام هوایی نهال‌های تیمارشده با خاک متأثر از فاضلاب در مقایسه با تیمار شاهد دیده شد. مطابق نتایج این پژوهش، محققان پیشین مانند Ali et al. (2013) با بررسی گونهٔ درختی *Kh. senegalensis*، Baldantoni et al. (2014) با بررسی دو کلن صنوبر مقاوم به فلزات سنگین از دو گونهٔ *P. alba* و *P. nigra* L. و Chandra & Kang (2015) با بررسی چهار صنوبر هیبرید شامل *P. euramericana*، *P. deltoids* W. Bartram Ex. Marshall *x P. nigra*، *P. tricocarpa* Torrey & A. Gray *x P. nigra* و *P. tricocarpa x P. deltoids* نیز گزارش کردند که گیاهان رشدیافته در خاک آلوده به فلزات سنگین یا آبیاری‌شده با فاضلاب نسبت به گیاهان شاهد مقادیر بیشتری از فلزات سنگین را در اندام‌های گیاهی تجمع دادند.

تأثیر کلن بر همهٔ پارامترهای رشد و زی‌تودهٔ بررسی‌شده به‌جز قطر ساقه و سطح برگ معنی‌دار ($P \leq ۰/۰۵$) بود. به‌طوری که پس از گذشت یک دورهٔ رویش، بیشترین طول ساقه و تولید زی‌توده در کلن *P. alba 44/13* در تیمار خاک متأثر از فاضلاب مشاهده شد. در واقع با توجه به اینکه جذب عناصر غذایی توسط گیاهان، افزون‌بر مقدار آنها در آب و خاک به نوع گیاه نیز بستگی دارد، به‌طور طبیعی مقدار افزایش رشد و تولید زی‌تودهٔ گونه‌های مختلف نیز متفاوت خواهد بود (Bozkurt & Yarilga, 2003).

دو کلن صنوبر کبوده از نظر مقدار جذب و تجمع اغلب عناصر غذایی کم‌مصرف و فلزات سنگین تحت بررسی تفاوت‌های معنی‌داری ($P \leq ۰/۰۵$) را نشان دادند، به‌طوری که بیشترین مقادیر اغلب عناصر و فلزات در اندام‌های گیاهی در کلن *P. alba 20/45* در تیمار خاک متأثر از آبیاری با فاضلاب مشاهده شد. در همین زمینه Zalesny Jr. & Bauer (2007) با ارزیابی چند کلن از گونه‌های مختلف صنوبر و بید آبیاری‌شده با فاضلاب نشان دادند که مقدار جذب و تجمع برای اغلب عناصر تحت تأثیر ژنوتیپ‌های گیاهی بود. همچنین Đelić et al. (2018) با بررسی مقدار جذب و تجمع فلزات سنگین در اندام‌های گیاهی دو گونه صنوبر نشان دادند که گونهٔ *P. tremula* L. فلزات آهن، منگنز، روی و مس را به مقدار

بیشتری از خاک جذب کرد و در اندام‌های گیاهی تجمع داد و در مقابل مقدار جذب فلز کادمیم در گونۀ *P. nigra* بیشتر بود. در پژوهش‌های دیگر مانند پژوهش Khosropour et al. (2018) نیز به مقدار جذب متفاوت فلزات سنگین توسط گونه‌های مختلف (چنار و کاج تهران) اشاره شده است.

الگوی رفتاری دو کلن صنوبر کبوده در تجمع عناصر غذایی کم‌مصرف و فلزات سنگین در اندام‌های گیاهی مشابه بود. به‌طوری که در هر دو کلن صنوبر، بیشترین غلظت عناصر آهن و مس به‌ترتیب در ریشه، برگ و ساقه و بیشترین غلظت عناصر روی و منگنز در برگ، ریشه و ساقه مشاهده شد. تعدادی از پژوهش‌های پیشین در گونه‌های مختلف صنوبر نیز نشان داده‌اند که عناصر روی و منگنز به‌سمت اندام‌های هوایی به‌ویژه برگ جابه‌جا می‌شود (Laureysens et al., 2004؛ Lingua et al., 2008 ؛ Lei et al., 2007؛Unterbrunner et al., 2007). عنصر مس به مقدار ناچیز به اندام برگ منتقل می‌شود (Kopponen et al., 2001; Todeschini et al., 2007). در هر دو کلن صنوبر، بیشترین جذب و تجمع فلزات سنگین نیکل، کروم و سرب در ریشه اتفاق افتاد. در کل در هر دو کلن، کمترین غلظت عناصر غذایی کم‌مصرف و فلزات سنگین در ساقه مشاهده شد. Baldantoni et al. (2014) نیز با بررسی روند جذب و تجمع فلزات سنگین متعدد در اندام‌های گیاهی دو گونه صنوبر تبریزی و کبودۀ رشدیافته در خاک آلوده به فلزات سنگین کمترین غلظت فلزات سنگین را برای هر دو گونه در ساقه مشاهده کردند. در بیشتر گونه‌های درختی، توزیع اغلب فلزات در میان اندام‌های گیاهی به‌صورت ریشه> برگ> ساقه است (Shi et al., 2011). در همین زمینه، تجمع بیشتر فلزات سنگین در ریشه نیز گزارش شده است (Kamalpour et al., 2014 ؛Pilipović et al., 2019). در واقع یکی از سازوکارهای دفاعی گیاه برای مقابله با سمیت و آلودگی فلزات سنگین در بسترهای رشد، تجمع بیشتر فلزات سنگین در ریشه و انتقال کمتر آن به اندام‌های هوایی است که بدین طریق اندام‌های متابولیسمی خود را از آسیب فلزات سنگین محافظت می‌کند (Sankar Ganesh et al., 2006).

نتیجه‌گیری

با توجه به عملکرد مناسب دو کلن صنوبر کبوده پس از یک دورۀ رویش در خاک متأثر از فاضلاب، می‌توان این دو کلن صنوبر را برای کاشت و زراعت چوب در خاک‌های متأثر از فاضلاب در نظر گرفت. شایان ذکر است که مقایسۀ عملکرد دو کلن صنوبر کبوده در خاک متأثر از فاضلاب نشان داد که نهال‌های کلن *P. alba 44/13* پس از یک دورۀ رویش از عملکرد رشد و تولید زی‌تودۀ بهتری برخوردار بودند. در مقابل، نهال‌های کلن *P. alba 20/45* توانستند مقادیر بیشتری از اغلب عناصر غذایی کم‌مصرف و فلزات سنگین را در اندام‌های گیاهی خود جذب کنند و تجمع دهند. در واقع کلن *P. alba 20/45* از پتانسیل گیاه‌پالایی بهتری نسبت به کلن *P. alba 44/13* برخوردار بود. کاشت درختان چوبده در اراضی متأثر از فاضلاب از یک‌سو با توجه به محتوای عناصر غذایی موجود در خاک و آب می‌تواند افزایش رشد و تولید زی‌تودۀ گیاهی را در پی داشته باشد و از سوی دیگر ازآنجا که درختان با توجه به مقاومت زیاد در برابر غلظت‌های فزاینده آلاینده‌ها، تولید زی‌تودۀ زیاد و سیستم ریشه‌ای وسیع و گسترده گزینه‌های مناسبی برای پالایش فلزات سنگین خاک هستند و توانایی تجمع مقادیر زیاد آلاینده‌ها را دارند (Paz-Alberto & Sigua, 2013)، می‌توان در درازمدت در به‌منظور گیاه‌پالایی و کاهش آلاینده‌ها در خاک گام برداشت.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله مراتب تشکر و قدردانی خود را از بنیاد ملی نخبگان و مؤسسۀ تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور بابت حمایت مالی از این پژوهش اعلام می‌دارند.

References

Aghabarati, A., Hosseni, S.M., Esmaeili, A., & 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., & El-Mahroukd, El-S.M. (2013). Performance of forest tree *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. under sewage effluent irrigation. *Ecological Engineering*, *61*, 117-126.

Aryal, N., & 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.

Baldantoni, D., Cicatelli, A., Bellino, A., & 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.

Bouyoucos, G.J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soil. *Journal of Agronomy*, *54*, 464-465.

Bozkurt, M.A., & Yarilga, 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*, *27*, 285-292.

Bremner, J.M. (1966). *Nitrogen-total*:1085-1121. In: Sparks DL, Page AL, Helmke PA, Loeppert RH, Soltanpour PN, Tabatabai MA, Johnston GT, Sumner ME (Eds.). Methods of Soil Analysis Part 3–Chemical Methods, SSSA Book Series 5.3. Soil Science Society of America, Inc., American Society of Agronomy, Inc., Madison, Wisconsin, U.S.A., 1390p.

Chandra, R., & Kang, H. (2015). Mixed heavy metal stress on photosynthesis, transpiration rate, and chlorophyll content in poplar hybrids. *Forest Science and Technology*, *12*, 55-61.

Đelić, G., Timotijević, S., & Simić, Z. (2018). Uptake and distribution of metals in *Populus nigra* and *Populus tremula*. *Acta Agriculturae Serbica*, *46*, 167-176.

Dimitriou, I., & Aronsson, P. (2011). Wastewater and sewage sludge application to willows and poplars grown in lysimeterse-Plant response and treatment efficiency. *Biomass and Bioenergy*, *35*, 161-170.

Egiarte, G., Camps Arbestain, M., Alonso, A., Ruı´z-Romera, E., & 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*, 257-269.

Goliński, P., Mleczek, M., Magdziak, Z., Gąsecka, M., Borowiak, K., Dąbrowski, J., Kaczmarek, Z., & Rutkowski, P. (2015). Efficiency of Zn phytoextraction, biomass yield and formation of low-molecular-weight organic acids in S×rubens-a hydroponic experiment. *Chemistry and Ecology*, *31*, 345-364.

Guo, L.B., & Sims, R.E.H. (2003). Soil response to *Eucalypt* tree planting and meatworks effluent irrigation in a short rotation forest regime in New Zealand. *Bioresource Technology*, *87*, 341-347.

Guo, L.B., Sims, R.E.H., & 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*, 393-404.

Houda, Z., Bejaoui, Z., Albouchi, A., Gupta, D.K., & Corpas, F.J. (2016). Comparative study of plant growth of two poplar tree species irrigated with treated wastewater, with particular reference to accumulation of heavy metals (Cd, Pb, As, and Ni). *Environmental Monitoring and Assessment*, *188*, 99.

Kabata-Pendias, A. (2011). *Trace Elements in Soils and Plants*, 4th edition. CRC Press, Boca Raton.

Kamalpour, S., Motesharezadeh, B., Alikhani, H.A., & Zarei, M. (2014). Effects of some biotic factors in lead phytoremediation and phosphorous uptake by Eucalyptus (*Eucalyptus Camaldulensis*). *Iranian Journal of Forest*, *5*, 457-470.

Khosropour, E., Attarod, P., Shirvani, A., Bayramzadeh, V., Moeinaddini, M., & Hakimi, L. (2018). Morphological and physiological properties of *Patanus orientalis* and *Pinus eldarica* leaves to urban pollution in Tehran. *Iranian Journal of Forest*, *10*(2), 123-137.

Kopponen, P., Utriainen, M., Lukkari, K., Suntioinen, S., Ka¨renlampi, L., & Ka¨renlampi, S. (2001). Clonal differences in copper and zinc tolerance of birch in metal-supplemented soils. *Environmental Pollution, 112*, 89-97.

Laureysens, I., Blust, R., Temmerman, L., Lemmens, C., & 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., & 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., & Berta, G. (2008). Arbuscular mycorrhizal fungi differentially affect the response to high zinc concentrations of two registered poplar clones. *Environmental Pollution*, *153*, 147-157.

Mataruga, Z., Jarić, S., Marković, M., Pavlović, M., Pavlović, D., Jakovljević, K., Mitrović, M., & 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., Miller, R.H. and Keeney, D.R., Eds., Methods of Soil Analysis, Part 2, Chemical and Microbiological Properties, Agronomy Monograph Number 9, Soil Science Society of America, Madison, 199-224.

Miguel, A.D., Meffe, R., Leal, M., González-Naranjo, V., Martínez-Hernández, V., Lillo, J., Martín, I., Salas, J.J., & Bustamante, I.D. (2014). Treating municipal wastewater through a vegetation filter with a short-rotation poplar species. *Ecological Engineering*, *73*, 560-568.

Mleczek, M., Rutkowski, P., Kaniuczak, J., Szostek, M., Budka, A., Magdziak, Z., Budzyńska, S., Kuczyńska-Kippen, N., & 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.

Moezzipour, A., Pourtahmasi, K., Motesharezadeh, B., Oladi, R., & Ramazani Saadatabadi, A. (2020). Effect of irrigation with municipal landfill leachate on the chemicals content of the tree shoots of *Populous* (*Populus deltoides*) and *Fraxinus* (*Fraxinus excelsior*). *Iranian Journal of Forest*, *11*(4), 459-475.

Nelson, D.W., & Sommers, L.E. (1996). *Total carbon, organic carbon, and organic matter*: 961-1010. In: Sparks DL, Page AL, Helmke PA, Loeppert RH, Soltanpour PN, Tabatabai MA, Johnston GT, Sumner ME (Eds.). Methods of Soil Analysis Part 3-Chemical Methods, SSSA Book Series 5.3. Soil Science Society of America, Inc., American Society of Agronomy, Inc., Madison, Wisconsin, U.S.A., 1390p.

Nissim, W.G., Jerbi, A., Lafleur, B., Fluet, R., & Labrecque, M. (2015). Willows for the treatment of municipal wastewater: Performance under different irrigation rates. *Ecological Engineering*, *81*, 395-404.

Olsen, S.R., Cole, C.V., Watanabe, F.S., & Deen, L.A. (1954). *Estimation of available phosphorus in soil by extracting with sodium bicarbonate* (USDA Circular no. 939). U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C., U.S.A, 19p.

Page, A.L., Miller, R.H., & Keeney, D.R. (1982). *Methods of soil analysis*, Part 2, Second Edition. American Society of Agronomy, Inc., Soil Science Society of America, , Inc., Madison, U.S.A., 1159p.

Paz-Alberto, A.M., & Sigua, G.C. (2013). Phytoremediation: a green technology to remove environmental pollutants. *American Journal of Climate Change*, *2*, 71-86.

Pilipović, A., Zalesny, Jr. R.S., Rončević, S., Nikolić, N., Orlović, S., Beljinc, J., & 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. (1982). *Soluble salts*. In: Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties, American Society of Agronomy-Soil Science Society of America, Madison, 167-179.

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.

Salehi, A., Tabari, M., Mohammadi, J., & 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.

Sankar Ganesh, K., Sundaramoorthy, P., & Chidambaram, A.L.A. (2006). Chromium toxicity effect on blackgram, soybean and paddy. *Pollution Research, 25*, 257-261.

Shi, X., Zhang, X., Chen, G., Chen, Y., Wang, L., & Shan, X. (2011). Seedling growth and metal accumulation of selected woody species in copper and lead/zinc mine tailings. *Journal of Environmental Sciences, 23*, 266-274.

Singh, G., & 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*, 1019-1028.

Singh, G., Bhati, M., & Rathod, Th. (2010). Use of tree seedlings for the phytoremediation of a municipal effluent used in dry areas of north-western India: Plant growth and nutrient uptake. *Ecological Engineering, 36*, 1299-1306.

Tabari, M., & 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*, 1438-1445.

Todeschini, V., Franchin, C., Castiglione, S., Burlando, B., Biondi, S., Torrigiani, P., Berta, G., & Lingua, G. (2007). Responses of two registered poplar clones to copper, after inoculation, or not, with arbuscular mycorrhizal fungi. *Caryologia, 60*, 146-155.

Toze, S. (2006). Reuse of effluent water-benefits and risks. *Agricultural Water Management, 80*, 147-159.

Tsakou, A., Rouli, M., & Christodoulaki, N.S. (2003). Growth parameters and heavy metal accumulation in poplar tree cultures (*Populus euramericana*) utilising water and sludge from a sewage treatment plant. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 71*, 330-337.

Tzanakakis, V.A., Paranychianakis, N.V., Londra, P.A., & Angelakis, A.N. (2011). Effluent application to the land: Changes in soil properties and treatment potential. *Ecological Engineering, 37*, 1757-1764.

Unterbrunner, R., Puschenreiter, M., Sommer, P., Wieshammer, G., Tlustos, P., Zupan, M., & Wenzel, W.W. (2007). Heavy metal accumulation in trees growing on contaminated sites in Central Europe. *Environmental Pollution, 148*, 107-114.

Yadav, R.K., Goyal, B., Sharma, R.K., Dubey, S.K., & Minhas, P.S. (2002). Post-irrigation impact of domestic sewage effluent on composition of soils, crops and ground water-a case study. *Environment International, 28*, 481-486.

Zalesny, Jr.R.S., & 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.

Iranian Journal of Forest
Vol. 14, No. 2, Summer 2022
pp. 119-133

Research Article

Study on the performance of two white poplar clones grown in heavy-metal contaminated soil and irrigated with municipal effluent

A. Salehi [1]*, and F. Ahmadloo[1]

[1] Assistant Prof., Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

(Received: 10 May 2021; Accepted: 6 November 2021)

Abstract

In this study, the effect of irrigation with municipal effluent on performance of two clones of *Populus alba* after one year growth was investigated. The test was done in a completely randomized design with two factors: 1) soil in two levels and 2) poplar clones in two levels. After one year growth, in both poplar clones, significant increase ($P \leq 0.01$) in growth and biomass parameters of plants treated by soil irrigated with municipal effluent was observed with the highest values in *P. alba 44/13* clone. Also, in both poplar clones, treatment of plants with soil affected by municipal effluent resulted in significant increase ($P \leq 0.01$) of nutrient and heavy metal concentration in plant organs compared to control plants. In both poplar clones, the highest uptake and accumulation of Fe, Cu, Ni, Cr and Pb were in the roots and Zn and Mn in the leaves. The effect of clone on the uptake and accumulation of most micronutrients and heavy metals was significant ($P \leq 0.05$). In general, the plants of *P. alba 20/45* accumulated higher amounts of micronutrients and heavy metals in plant organs. The results of the present study showed that after one year growth, *P. alba* 44/13 clone had better growth performance and biomass production and *P. alba* 20/45 clone demonstrated higher uptake and accumulation potential of most micronutrients and heavy metals in plant organs. In general, due to good performance of two studied poplar clones, both poplar clones can be considered for wood farming in lands affected by municipal effluent.

Keywords: Biomass, Growth, Municipal effluent, *Populus alba*, Wood farming.

*Corresponding author Tel: +98 9128355662 Email: az.salehi@rifr-ac.ir