مجلهٔ جنگل ایران، انجمن جنگلبانی ایران
سال هفدهم، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۴۰۴
ص ۲۲۴-۲۱۱
مقاله پژوهشی

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22034/ijf.2025.493216.2024
CC BY 4.0

تأثیر کوددهی با لجن فاضلاب بر ویژگی‌های خاک و پاسخ‌های رویشی درختان صنوبر کبوده سه‌ساله (*Populus alba* L.)

آزاده صالحی [۱*]، سارا تیموری [۲] و پدرام غدیری‌پور [۳]

[۱]استادیار پژوهشی، مؤسسهٔ تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، ترویج و آموزش کشاورزی، تهران، ایران.
[۲]استادیار پژوهشی، مؤسسهٔ تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، ترویج و آموزش کشاورزی، تهران، ایران.
[۳]کارشناس پژوهش، مؤسسهٔ تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، ترویج و آموزش کشاورزی، تهران، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۴)

چکیده

مقدمه: در زراعت چوب همانند دیگر فعالیت‌های زراعی، مصرف انواع کود شیمیایی و آلی می‌تواند سبب افزایش تولید در واحد سطح شود. لجن فاضلاب به‌عنوان محصول فرعی مهم ناشی از فرایند تصفیهٔ فاضلاب، نوعی پسماند آلی است که می‌تواند سبب افزایش مادهٔ آلی و عناصر غذایی خاک شده و در افزایش رشد و عملکرد گیاه اثر بسزایی داشته باشد. با توجه به ضرورت مدیریت و دفع مناسب لجن فاضلاب تولیدشده در تصفیه‌خانه‌ها و بهبود خصوصیات فیزیکی- شیمیایی خاک در نتیجهٔ کاربرد لجن فاضلاب به‌عنوان نوعی پسماند آلی، هدف این پژوهش، بررسی تأثیر کوددهی با لجن فاضلاب بر ویژگی‌های خاک و عملکرد رویشی درختان صنوبر کبوده سه‌ساله (*Populus alba* L. "20/45") بود.

مواد و روش‌ها: این پژوهش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی (سه بلوک) با تیمار لجن فاضلاب در سه سطح (۰، ۱۰ و ۲۰ کیلوگرم بر متر مربع) و سه پلات ۱۶ متر مربعی (نه اصله درخت با فواصل کاشت ۲×۲ متر در هر پلات) در هر بلوک در ایستگاه تحقیقاتی البرز مؤسسهٔ تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور انجام گرفت. در پایان هر فصل رویش به‌مدت سه سال، در هر تیمار متغیرهای رویشی (قطر برابرسینه و ارتفاع کل) همهٔ درختان اندازه‌گیری و عملکرد تولید چوب محاسبه شد. در اواسط فصل رویش سوم، نمونه‌های گیاهی (ریشه، ساقه و برگ) و نمونه‌های خاک از هر تیمار در سه تکرار جمع‌آوری شد. در آزمایشگاه ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی خاک و غلظت عناصر غذایی و فلزات سنگین اندام‌های گیاهی تعیین شد.

یافته‌ها: کوددهی با لجن فاضلاب سبب افزایش معنی‌دار کربن آلی و سطح عناصر غذایی نیتروژن، فسفر، سولفور، روی ($P \leq ۰/۰۱$) و مس ($P \leq ۰/۰۵$) در خاک شد. به‌طوری که در تیمار ۲۰ کیلوگرم بر متر مربع لجن فاضلاب، کربن آلی خاک نسبت به تیمار شاهد افزایش ۳۸۱/۸ درصدی نشان داد. همچنین تیمار ۲۰ کیلوگرم بر متر مربع لجن فاضلاب سبب افزایش معنی‌دار غلظت نیکل، کروم ($P \leq ۰/۰۵$) و سرب ($P \leq ۰/۰۱$) در خاک نسبت به تیمار شاهد شد. نتایج بررسی متغیرهای رویشی درختان صنوبر کبوده سه‌ساله نشان داد که کوددهی با لجن فاضلاب بر متغیرهای قطر برابرسینه، ارتفاع و حجم در هکتار درختان صنوبر تأثیر مثبت معنی‌داری داشت، به‌طوری که تیمار ۲۰ کیلوگرم بر متر مربع لجن فاضلاب به‌ترتیب سبب افزایش ۱۹، ۲۰ و ۶۳/۵ درصدی قطر برابرسینه، ارتفاع و حجم در هکتار درختان نسبت به تیمار شاهد شد. کوددهی با لجن فاضلاب سبب افزایش معنی‌دار غلظت عناصر غذایی نیتروژن و فسفر در اندام‌های ریشه، ساقه و برگ درختان صنوبر شد. تأثیر کوددهی با لجن فاضلاب بر غلظت برخی عناصر غذایی کمیاب شامل روی در اندام‌های ریشه، ساقه و برگ ($P \leq ۰/۰۱$) و مس در اندام‌های ریشه و برگ ($P \leq ۰/۰۵$) نیز معنی‌دار بود. همچنین کوددهی با لجن فاضلاب سبب افزایش معنی‌دار غلظت فلز نیکل در اندام‌های ریشه و برگ ($P \leq ۰/۰۵$) درختان صنوبر شد.

نتیجه‌گیری: با توجه به افزایش عملکرد رویشی درختان صنوبر کبوده در خاک کوددهی‌شده با لجن فاضلاب پس از گذشت سه سال و نبود تفاوت معنی‌دار بین سطوح کاربردی لجن فاضلاب از یک‌سو و افزایش سطح برخی فلزات سنگین خاک در تیمار ۲۰ کیلوگرم بر متر مربع لجن فاضلاب از سوی دیگر، برای صنوبرکاری با درختان کبوده در شرایطی مشابه با شرایط پژوهش حاضر، کوددهی با تیمار ۱۰ کیلوگرم بر متر مربع لجن فاضلاب توصیه می‌شود. البته با توجه به دورهٔ بهره‌برداری حداقل شش تا هشت سال برای صنوبرکاری‌ها، باید تأثیر کاربرد لجن فاضلاب حداقل تا پایان سال ششم از نظر تأثیر بر ویژگی‌های خاک و عملکرد رویشی درختان صنوبر بررسی شود.

واژه‌های کلیدی: اصلاح‌کنندهٔ خاک، پسماند آلی، تولید چوب، عناصر غذایی، فلزات سنگین.

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

مقدمه

در زراعت چوب همانند دیگر فعالیت‌های زراعی، مصرف انواع کود شیمیایی و آلی می‌تواند سبب افزایش تولید در واحد سطح شود. امروزه استفاده از پسماندهای آلی به‌عنوان کود برای بهبود خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک متداول است. به‌طوری که عمده‌ترین منابع تأمین‌کنندهٔ مواد آلی خاک، کودهای دامی، بقایای گیاهی، لجن فاضلاب و کمپوست است (Pozesh shirazi et al., 2012). استفاده از لجن فاضلاب به‌عنوان کود آلی در خاک‌های کشاورزی در سال‌های اخیر به‌دلیل مغذی بودن با عناصر غذایی موردنیاز گیاهان رواج زیادی یافته است. لجن فاضلاب به‌عنوان نوعی پسماند آلی، محصول فرعی مهم ناشی از فرایند تصفیهٔ فاضلاب در تصفیه‌خانه‌هاست. لجن فاضلاب رسوباتی تشکیل‌شده از مواد معدنی و آلی است که طی مراحل مختلف تصفیه (فیزیکی، شیمیایی و زیستی) به‌صورت تودهٔ غلیظی از فاضلاب جدا می‌شود (Singh & Agrawal, 2008). به‌طور کلی لجن فاضلاب از ترکیبات آلی، عناصر غذایی، دامنهٔ وسیعی از ریزمغذی‌ها، فلزات سنگین، آلاینده‌های آلی و میکروارگانیسم‌ها تشکیل می‌شود (Kulling, 2001). لجن فاضلاب می‌تواند با تأثیر بر ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی خاک مانند مادهٔ آلی، عناصر غذایی اصلی، ریزمغذی‌ها، تخلخل و ظرفیت نگهداشت آب در خاک، در افزایش رشد و عملکرد گیاه، اثر مهمی داشته باشد (Boudjabi & Chenchouni, 2021). همچنین، با توجه به زیاد بودن مواد آلی و عناصر غذایی موجود در لجن فاضلاب، اصلاح خاک با آن، افزایش فعالیت آنزیمی، فعالیت‌های زیستی و همچنین تولید زی‌تودهٔ میکروبی خاک را در پی خواهد داشت (Soudani et al., 2017). قیمت ارزان و در دسترس بودن لجن فاضلاب از یک‌سو و مزایای مثبت آن از سوی دیگر، استفاده از این پسماند آلی را به‌عنوان کود در کشاورزی توجیه می‌کند.

با وجود این، در لجن فاضلاب ممکن است غلظت‌های زیادی از فلزات سنگین و سمی نیز وجود داشته باشد که با آلودگی خاک و انتقال این آلودگی به زنجیرهٔ غذایی، سلامت موجودات زنده با خطر جدی مواجه می‌شود (Baran et al., 2001; Ansari et al., 2022; Feng et al., 2023). بنابراین کشت محصولات کشاورزی در خاک‌های اصلاح‌شده با لجن فاضلاب می‌تواند سبب ورود فلزات سنگین و عوامل بیماری‌زا به زنجیرهٔ غذایی شود. در مقابل، ازآنجا که یکی از کاربردهای لجن فاضلاب می‌تواند استفاده از آن در جنگلکاری‌ها و زراعت چوب باشد و همچنین با توجه به تولید سالانه مقادیر زیادی لجن فاضلاب در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، می‌توان از این پسماند آلی ارزان‌قیمت با رعایت استانداردهای زیست‌محیطی برای افزایش تولید چوب در واحد سطح و مدیریت و دفع مناسب و ایمن آن استفاده کرد. گونه‌های درختی به‌ویژه گونه‌های درختی تندرشد مانند صنوبرها و بیدها به‌عنوان گونه‌های تجاری مهم با اهداف چندمنظوره (Salehi et al., 2022) می‌توانند گزینه‌های مهمی برای کشت در خاک‌های متأثر از فاضلاب یا لجن فاضلاب باشند (Salehi & Ahmadloo, 2022). همچنین، این درختان با توجه به تولید زی‌تودهٔ زیاد و مقاومت و ظرفیت انباشت زیاد فلزی، گزینه‌های مناسبی برای گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین نیز هستند (Pulford & Dickinson, 2005; Utmazian et al., 2007; Salehi et al., 2023; Salehi & Shariat, 2024). در پژوهش‌ها روی درختان تندرشد بید (Sevel et al., 2014)، صنوبر (Tsakou et al., 2003) و اکالیپتوس (Ferraz et al., 2016)، تأثیر مثبت استفاده از لجن فاضلاب به‌عنوان اصلاح‌کنندهٔ خاک بر عملکرد رویشی درختان گزارش شده است. Soudani et al. (2017) نیز در بررسی خود نشان دادند که نهال‌های *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. کوددهی‌شده با لجن فاضلاب ۲۰ درصد رشد بهتری نسبت به نهال‌های شاهد داشتند. همچنین Žaltauskaitė et al. (2017) گزارش کردند که تحت

تأثیر کاربرد لجن فاضلاب در خاک، در نهال‌های یکساله *Salix viminalis* L.، ارتفاع ساقه ۱۵ تا ۳۱ درصد، زی‌تودهٔ ساقه ۲۶ تا ۶۱ درصد و زی‌تودهٔ ریشه ۳۶ تا ۶۲ درصد بیشتر نسبت به گیاهان شاهد بود.

پژوهش‌های بسیار اندکی از داخل کشور در زمینهٔ استفاده از پسماندهای آلی به‌عنوان اصلاح و تقویت‌کنندهٔ خاک در جنگلکاری و زراعت چوب گزارش شده و بیشتر پژوهش‌ها در خصوص گونه‌های زراعی بوده است. از سوی دیگر، با توجه به ضرورت مدیریت و دفع مناسب لجن فاضلاب تولیدشده در تصفیه‌خانه‌ها و بهبود خصوصیات فیزیکی- شیمیایی خاک در نتیجهٔ کاربرد لجن فاضلاب به‌عنوان نوعی پسماند آلی، در پژوهش انجام‌گرفته پس از گذشت سه سال از اصلاح خاک با لجن فاضلاب، تأثیرات استفاده از لجن فاضلاب تولیدشده در تصفیه‌خانهٔ فاضلاب جنوب تهران بر ویژگی‌های خاک و عملکرد رویشی درختان صنوبر کبوده (*P. alba* "20/45") طی یک تحقیق عرصه‌ای بررسی شد.

مواد و روش‌ها

منطقهٔ پژوهش

این پژوهش در ایستگاه تحقیقاتی البرز مؤسسهٔ تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور با طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۵۴ دقیقهٔ شرقی، عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۸ دقیقهٔ شمالی، ارتفاع ۱۳۰۰ متر از سطح دریا، میانگین بارندگی سالیانهٔ ۲۵۰ میلی‌متر و میانگین درجهٔ حرارت ۱۳/۷ درجهٔ سانتی‌گراد انجام گرفت.

شیوهٔ اجرای پژوهش

بدین منظور، در ابتدا لجن فاضلاب خشک از تصفیه‌خانهٔ فاضلاب جنوب تهران (فاضلاب ورودی به این تصفیه‌خانه، فاضلاب‌های شهری و خانگی است) تهیه و به محل اجرای پروژه منتقل شد. مشخصات فیزیکی- شیمیایی لجن استفاده‌شده در این پژوهش در جدول ۱ آمده است. سپس زمینی مناسب کشت صنوبر از نظر خاک و دسترسی به منابع آبی در اواخر بهمن ۱۳۹۸ آماده‌سازی (شخم، دیسک، تسطیح و حفر گودال) شد. در اواسط اسفند، نهال‌های همگن از کلن مدنظر صنوبر کبوده (*P. alba* "20/45") با فواصل ۲×۲ متر کاشته شد. در زمان کاشت نهال‌ها، تیمار لجن فاضلاب در سه سطح شامل ۰، ۱۰ و ۲۰ کیلوگرم بر متر مربع در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی (سه بلوک) با سه پلات (۱۶ متر مربعی) (تعداد نهال در هر پلات: نه اصله) در هر بلوک بر بستر کاشت اعمال شد. آبیاری عرصه در طول اجرای پروژه با سیستم قطره‌ای و دور یک بار در هفته انجام گرفت. در طول اجرای پروژه، عملیات داشت و آبیاری عرصه به‌صورت کاملاً یکسان برای همهٔ تیمارها انجام گرفت. شایان ذکر است که عملیات کوددهی درختان صنوبر با لجن فاضلاب به‌صورت یک‌سال در میان براساس تیمارهای ذکرشده انجام گرفت.

در پایان هر فصل رویش به‌مدت سه سال متغیرهای رویشی (قطر برابرسینه و ارتفاع کل) همهٔ درختان صنوبر در هر تیمار لجن فاضلاب اندازه‌گیری و ثبت شد و در نهایت عملکرد تولید چوب درختان در تیمارهای مختلف با محاسبهٔ حجم تک‌درخت (رابطهٔ ۱) (Zobeiri, 2005) و حجم در هکتار (تعداد درختان در هکتار با توجه به فاصلهٔ کاشت: ۲۵۰۰ اصله درخت) تعیین شد. همچنین، در طول هر فصل رویش به‌صورت ماهیانه همهٔ درختان صنوبر در تیمارهای مدنظر از نظر آفات و بیماری‌ها پایش و بررسی شدند. در اواسط فصل رویش سوم، نمونه‌های گیاهی (ریشه، ساقه و برگ) و نمونه‌های خاک (عمق ۰ تا ۶۰ سانتی‌متری با حفر گودال در اطراف هر درخت) از هر تیمار در سه تکرار جمع‌آوری و به آزمایشگاه منتقل شدند. پس از آماده‌سازی اولیهٔ نمونه‌های خاک و گیاه، نمونه‌های گیاهی به‌مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۲ درجهٔ سانتی‌گراد خشک و سپس آسیاب شدند.

رابطهٔ (۱)

$$V = 0.4 \times d2 \times h$$

جدول ۱- مشخصات فیزیکی- شیمیایی لجن فاضلاب
Table 1. Physicochemical properties of sewage sludge

پارامتر Parameter	لجن فاضلاب Sewage Sludge	EPA	پارامتر Parameter	لجن فاضلاب Sewage Sludge	EPA
نیتروژن N (%)	3.69	-	کادمیم Cd (mg/kg)	1.98	39
فسفر P (mg/kg)	23.83	-	کبالت Co (mg/kg)	16.2	1500
پتاسیم K (mg/kg)	328	-	کروم Cr (mg/kg)	259	1200
آهن Fe (mg/kg)	2790	-	آرسنیک As (mg/kg)	26.05	41
روی Zn (mg/kg)	1284	2800	سرب Pb (mg/kg)	235	300
مس Cu (mg/kg)	290	1500	نیکل Ni (mg/kg)	158.79	420
کلیفرم‌های مدفوعی Fecal Coliform (MPN/g)	127	<1000	باکتری سالمونلا Salmonella (MPN/g)	0	<3

در نمونه‌های خاک، گیاه (ریشه، ساقه و برگ) و لجن، نیتروژن به‌روش کجلدال (Bremner, 1996) و غلظت عناصر غذایی فسفر و پتاسیم و عناصر کم‌مصرف (آهن، روی، منگنز و مس) و فلزات سنگین (نیکل، کروم، کادمیم و سرب) 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. در این پژوهش، به‌منظور کنترل کیفیت آزمایش و ارزیابی صحت داده‌های عناصر و فلزات سنگین اندازه‌گیری شده در نمونه‌های گیاهی از دو مادهٔ مرجع استاندارد 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) و در نمونه‌های خاک از مادهٔ مرجع استاندارد CRM059-Trace Metals-Loamy Clay 2 (Sigma-Aldrich, USA) استفاده شد. همچنین، مشخصات فیزیکی- شیمیایی نمونه‌های خاک و لجن شامل بافت به‌روش هیدرومتری (Bouyoucos, 1962)، اسیدیته (pH) به‌روش گل اشباع (Mclean,1982)، هدایت الکتریکی (EC) به‌روش عصارهٔ گل اشباع (Rhoades, 1982) و کربن آلی به‌روش واکلی- بلک (Nelson & Sommers, 1996) اندازه‌گیری شد.

تجزیه‌وتحلیل داده‌ها با نرم‌افزار آماری SPSS نسخهٔ ۲۷ انجام گرفت. با توجه به نرمال و همگن بودن داده‌ها طبق آزمون‌های شاپیرو- ویلک و لون، برای بررسی تأثیر تیمارهای لجن فاضلاب بر متغیرهای تحت بررسی از آزمون تجزیهٔ واریانس یکطرفه و برای گروه‌بندی و مقایسهٔ میانگین‌ها از آزمون توکی استفاده شد.

نتایج

تأثیر کوددهی با لجن فاضلاب بر ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی خاک

بررسی ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی خاک عرصهٔ کاشت (عمق ۰ تا ۶۰ سانتی‌متر) پس از گذشت سه سال در تیمارهای مختلف نشان داد که کوددهی با لجن فاضلاب بر ویژگی‌های خاک شامل بافت، اسیدیته، شوری و غلظت عناصر پتاسیم، آهن، منگنز و کادمیم تأثیر معنی‌داری ($P > ۰/۰۵$) نداشت. در مقابل، کوددهی با لجن فاضلاب سبب افزایش معنی‌دار درصد کربن آلی خاک و غلظت عناصر غذایی نیتروژن، فسفر، سولفور، روی ($P \leq ۰/۰۱$) و مس ($P \leq ۰/۰۵$) شد و بیشترین مقادیر در تیمار ۲۰ کیلوگرم بر متر مربع لجن فاضلاب مشاهده شد. همچنین تیمار ۲۰ کیلوگرم بر متر مربع لجن فاضلاب سبب افزایش معنی‌دار غلظت برخی فلزات سنگین مانند نیکل، کروم ($P \leq ۰/۰۵$) و سرب ($P \leq ۰/۰۱$)

در خاک شد. در مقابل بین تیمار ۱۰ کیلوگرم بر متر مربع لجن فاضلاب و تیمار شاهد از نظر غلظت فلزات سنگین خاک تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد (جدول ۲). شایان ذکر است که خصوصیات خاک عرصه، قبل از کاشت نهال‌ها نیز بررسی شد. ویژگی‌های خاک قبل از شروع آزمایش و در پایان آزمایش تفاوت معنی‌داری نداشت، بنابراین خاک تیمار شاهد نمایندهٔ خصوصیات خاک عرصهٔ کاشت است.

تأثیر کوددهی با لجن فاضلاب بر متغیرهای رویشی درختان صنوبر کبوده

اندازه‌گیری متغیرهای رویشی درختان صنوبر کبوده در تیمارهای مختلف لجن فاضلاب در پایان فصل رویش اول نشان داد که کوددهی با لجن فاضلاب تأثیر معنی‌داری بر متغیرهای قطر برابرسینه، ارتفاع و حجم در هکتار درختان صنوبر نداشت ($P > ۰/۰۵$). در پایان فصل رویش دوم، قطر برابرسینه و حجم در هکتار درختان صنوبر با کاربرد لجن فاضلاب افزایش معنی‌داری ($P \leq ۰/۰۱$) داشت و بین دو تیمار لجن فاضلاب تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. اما ارتفاع کل درختان صنوبر تحت تأثیر تیمارهای به‌کاررفته قرار نگرفت. نتایج بررسی متغیرهای رویشی درختان صنوبر کبوده در انتهای فصل رویش سوم نشان داد که کوددهی با لجن فاضلاب بر متغیرهای قطر برابرسینه، ارتفاع و حجم در هکتار درختان صنوبر کبوده تأثیر معنی‌داری داشت ($P \leq ۰/۰۱$) و با وجود مقادیر بیشتر این متغیرها در تیمار ۲۰ کیلوگرم بر متر مربع لجن فاضلاب، با تیمار ۱۰ کیلوگرم بر متر مربع اختلاف معنی‌داری نداشت (جدول ۳).

جدول ۲- تأثیر کوددهی با لجن فاضلاب بر ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی خاک (میانگین ± اشتباه معیار)

Table 2. Effects of sewage sludge application on soil physicochemical properties (means ±SE)

تیمارهای لجن فاضلاب Sewage sludge treatment	بافت Texture	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی EC (ds/m)	کربن آلی (٪) OC (%)	نیتروژن (٪) N (%)	فسفر (g/kg) P (g/kg)	پتاسیم (g/kg) K (g/kg)	سولفور S (mg/kg) (mg/kg)
شاهد Control	Clay loam	8.1 ± 0.370 a	1.3 ± 0.080 a	0.66 ± 0.072 c	0.07 ± 0.004 c	0.850 ± 0.070 c	20.55 ± 1.25 a	220.01 ± 10.58 c
۱۰ کیلوگرم بر متر مربع 10 kg/m²	Clay loam	7.7 ± 0.289 a	1.6 ± 0.098 a	2.40 ± 0.122 b	0.19± 0.008 b	1.40 ± 0.095 b	20.01 ± 1.36 a	406.17 ± 17.59 b
۲۰ کیلوگرم بر متر مربع 20 kg/m²	Clay loam	7.5 ± 0.334 a	1.4 ± 0.102 a	3.18 ± 0.301 a	0.28 ± 0.012 a	2.18 ± 0.110 a	19.75 ± 1.28 a	547.01 ± 33.51 a
آماره F F-value	-	0.564	0.401	17.96	15.88	14.64	5.51	6.87
معنی‌داری Significance	-	0.455 ns	0.356 ns	0.000 **	0.000 **	0.005 **	0.098 ns	0.028 *
ضریب تغییرات CV	-	3.05	2.12	47.32	38.58	42.7	3.15	49.3

تیمارهای لجن فاضلاب Sewage sludge treatment	آهن (g/kg) Fe (g/kg)	مس (mg/kg) Cu (mg/kg)	روی (mg/kg) Zn (mg/kg)	منگنز (mg/kg) Mn (mg/kg)	نیکل (mg/kg) Ni (mg/kg)	کروم (mg/kg) Cr (mg/kg)	سرب (mg/kg) Pb (mg/kg)	کادمیم (mg/kg) Cd (mg/kg)
شاهد Control	31.32 ± 1.28 a	37.01 ± 1.57 b	91.07 ± 3.20 b	895.83 ± 21.20 a	38.28 ± 1.58 b	35.55 ± 1.60 b	25.14 ± 1.33 b	0.253 ± 0.006 a
۱۰ کیلوگرم بر متر مربع 10 kg/m²	31.26 ± 1.35 a	48.33 ± 2.72 ab	132.33 ± 7.96 a	887.17 ± 23.02 a	39.09 ± 1.33 b	37.25 ± 1.58 b	27.11 ± 1.60 ab	0.256 ± 0.009 a
۲۰ کیلوگرم بر متر مربع 20 kg/m²	31.01 ± 1.45 a	58.67 ± 4.68 a	169.01 ± 10.03 a	865.33 ± 25.01 a	41.89 ± 1.83 a	40.81 ± 1.81a	29.66 ± 1.84 a	0.276 ± 0.010 a
آماره F F-value	0.375	8.27	11.31	4.21	13.92	9.58	18.60	0.623
معنی‌داری Significance	0.702 ns	0.019 *	0.009 **	0.072 ns	0.006 *	0.014 *	0.003 **	0.568 ns
ضریب تغییرات CV	1.4	23.4	29.01	2.02	4.6	7.4	7.9	10.2

**معنی‌داری در سطح ۹۹ درصد؛ *معنی‌داری در سطح ۹۵ درصد؛ ns نبود تفاوت معنی‌دار آماری؛ حروف انگلیسی متفاوت تفاوت معنی‌دار آماری بین تیمارها را نشان می‌دهد.

$^{**}P \leq 0.01$, $^{*}P \leq 0.05$, $^{ns}P > 0.05$; Different letters indicate significant differences between treatments.

جدول ۳- تأثیرکوددهی با لجن فاضلاب بر متغیرهای رویشی درختان صنوبر کبوده (میانگین ± اشتباه معیار)

Table 3. Effect of sewage sludge application on growth parameters of *P. alba* trees (means ±SE)

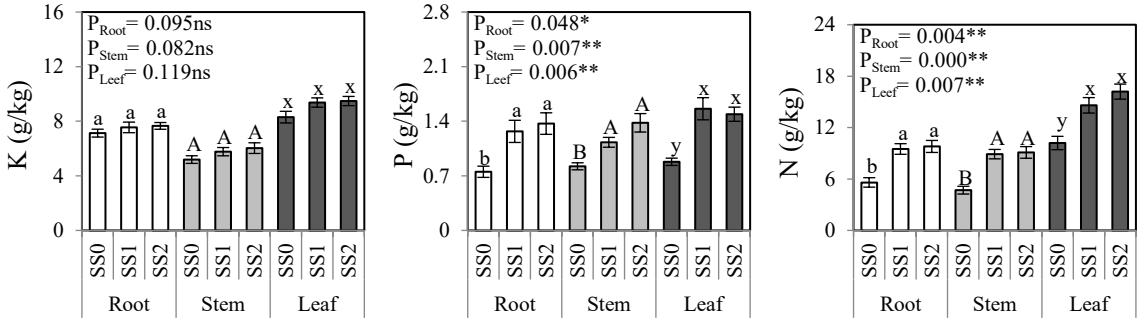
تیمارهای لجن فاضلاب Sewage sludge treatment	متغیرهای رویشی فصل رویش اول growth parameters of the first growing season			متغیرهای رویشی فصل رویش دوم growth parameters of the second growing season			متغیرهای رویشی فصل رویش سوم growth parameters of the third growing season		
	قطر برابرسینه (cm) DBH (cm)	ارتفاع (m) Height (m)	حجم (m^3/ha) Volume (m^3/ha)	قطر برابرسینه (cm) DBH (cm)	ارتفاع (m) Height (m)	حجم (m^3/ha) Volume (m^3/ha)	قطر برابرسینه (cm) DBH (cm)	ارتفاع (m) Height (m)	حجم (m^3/ha) Volume (m^3/ha)
شاهد Control	2.08 ± 0.194 a	3.02 ± 0.218 a	1.55 ± 0.195 a	3.69 ± 0.187 b	4.65 ± 0.174 a	6.53 ± 0.536 b	5.72 ± 0.194 b	6.08 ± 0.218 b	21.26 ± 2.11 b
۱۰ کیلوگرم بر متر مربع 10 kg/m^2	2.26 ± 0.124 a	3.10 ± 0.238 a	1.74 ± 0.190 a	4.23 ± 0.125 a	4.72 ± 0.122 a	9.61 ± 0.124 a	6.61 ± 0.124 a	6.77 ± 0.238 ab	30.40 ± 2.01 a
۲۰ کیلوگرم بر متر مربع 20 kg/m^2	2.11 ± 0.152 a	3.20 ± 0.249 a	1.54 ± 0.164 a	4.34 ± 0.128 a	4.91 ± 0.149 a	10.91 ± 0.152 a	6.81 ± 0.152 a	7.30 ± 0.149 a	34.79 ± 2.05 a
آمارهٔ F F-value	0.952	0.564	0.367	10.21	2.08	14.76	13.35	9.67	12.22
معنی‌داری Significance	0.390 ns	0.571 ns	0.694 ns	0.000 **	0.131 ns	0.000 **	0.001 **	0.001 **	0.000 **
ضریب تغییرات CV	23.6	16.11	26.9	15.40	10.40	40.8	15.10	16.6	41.3

**معنی‌داری در سطح ۹۹ درصد؛ *معنی‌داری در سطح ۹۵ درصد؛ ns نبود تفاوت معنی‌دار آماری؛ حروف انگلیسی متفاوت تفاوت معنی‌دار آماری بین تیمارها را نشان می‌دهد.

$^{**}P \le 0.01$, $^{*}P \le 0.05$, $^{ns}P > 0.05$; Different letters indicate significant differences among treatments.

تأثیر کوددهی با لجن فاضلاب بر غلظت عناصر غذایی اندام‌های گیاهی

کوددهی با لجن فاضلاب سبب افزایش معنی‌دار ($P \le$ ۰/۰۱) غلظت عناصر غذایی اصلی نیتروژن (N) و فسفر (P) در اندام‌های ریشه، ساقه و برگ درختان صنوبر کبوده شد، اما دو تیمار لجن فاضلاب از این نظر تفاوت معنی‌داری نشان ندادند. در مقابل، کوددهی با لجن فاضلاب تأثیر معنی‌داری (۰/۰۵ P >) بر غلظت پتاسیم (K) اندام‌های ریشه، ساقه و برگ نداشت (شکل ۱).



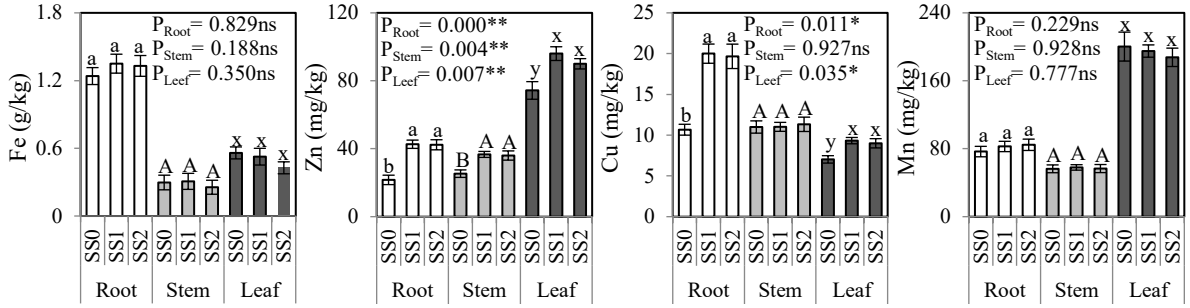
شکل ۱- غلظت عناصر غذایی اصلی در اندام‌های ریشه، ساقه و برگ درختان صنوبر کبوده تحت تأثیر تیمارهای لجن فاضلاب (میانگین ± اشتباه معیار)؛ SS0: تیمار شاهد، SS1: تیمار ۱۰ کیلوگرم بر متر مربع لجن فاضلاب، SS2: تیمار ۲۰ کیلوگرم بر متر مربع لجن فاضلاب؛ در هر اندام گیاهی، حروف انگلیسی متفاوت تفاوت معنی‌دار آماری بین تیمارهای تحت بررسی را نشان می‌دهد؛ **معنی‌داری در سطح ۹۹ درصد؛ *معنی‌داری در سطح ۹۵ درصد؛ ns نبود تفاوت معنی‌دار آماری

Figure 1. Macro-nutrient concentrations of plant tissues in *P. alba* trees affected by sewage sludge treatments (means ± SE); SS0: Control treatment, SS1: 10 kg/m^2 of sewage sludge treatment, SS2: 20 kg/m^2 of sewage sludge treatment; in each tissue different letters indicate significant differences between treatments; $^{**}P \le 0.01$, $^{*}P \le 0.05$, $^{ns}P > 0.05$

کوددهی با لجن فاضلاب بر غلظت عناصر غذایی کم‌مصرف شامل روی (Zn) در اندام‌های ریشه، ساقه و برگ ($P \leq ۰/۰۱$) و مس (Cu) در اندام‌های ریشه و برگ ($P \leq ۰/۰۵$) معنی‌دار بود، اما بین سطوح کاربردی لجن فاضلاب تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. در مقابل، کوددهی با لجن فاضلاب بر غلظت عناصر آهن (Fe) و منگنز (Mn) موجود در اندام‌های گیاهی تأثیر معنی‌داری ($P > ۰/۰۵$) نداشت (شکل ۲).

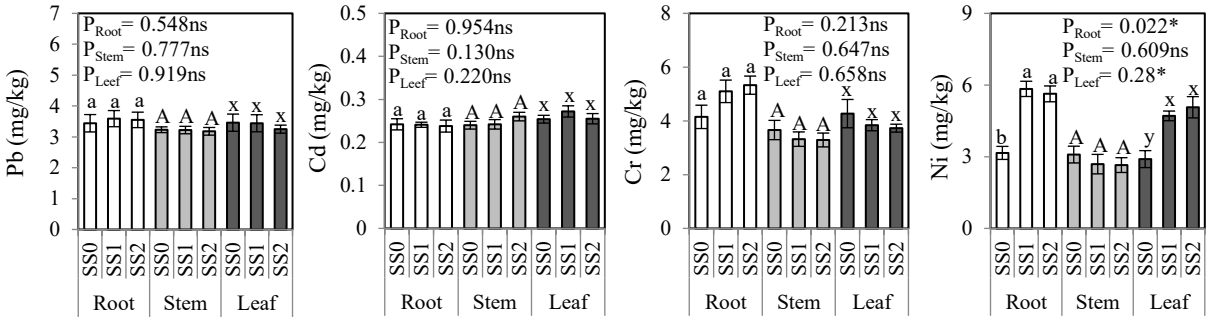
تأثیر کوددهی با لجن فاضلاب بر غلظت فلزات سنگین اندام‌های گیاهی

کوددهی با لجن فاضلاب سبب افزایش معنی‌دار ($P \leq ۰/۰۵$) غلظت فلز نیکل (Ni) در اندام‌های ریشه و برگ درختان صنوبر شد. در مقابل، بر روی غلظت کروم (Cr)، کادمیم (Cd) و سرب (Pb) اندام‌های گیاهی تأثیر معنی‌داری ($P > ۰/۰۵$) نداشت (شکل ۳).



شکل ۲- غلظت عناصر غذایی کمیاب در اندام‌های ریشه، ساقه و برگ درختان صنوبر کبوده تحت تأثیر تیمارهای لجن فاضلاب (میانگین ± اشتباه معیار)؛ SS0: تیمار شاهد، SS1: تیمار ۱۰ کیلوگرم بر متر مربع لجن فاضلاب، SS2: تیمار ۲۰ کیلوگرم بر متر مربع لجن فاضلاب؛ در هر اندام گیاهی، حروف انگلیسی متفاوت تفاوت معنی‌دار آماری بین تیمارهای تحت بررسی را نشان می‌دهد؛ **معنی‌داری در سطح ۹۹ درصد؛ *معنی‌داری در سطح ۹۵ درصد؛ ns نبود تفاوت معنی‌دار آماری

Figure 2. Micro-nutrient concentrations of plant tissues in *P. alba* trees affected by sewage sludge treatments (means ± SE); SS0: Control treatment, SS1: 10 kg/m^2 of sewage sludge treatment, SS2: 20 kg/m^2 of sewage sludge treatment; in each tissue different letters indicate significant differences between treatments; **$P \leq 0.01$, * $P \leq 0.05$, ns $P > 0.05$.



شکل ۳- غلظت فلزات سنگین در اندام‌های ریشه، ساقه و برگ درختان صنوبر کبوده تحت تأثیر تیمارهای لجن فاضلاب (میانگین ± اشتباه معیار)؛ SS0: تیمار شاهد، SS1: تیمار ۱۰ کیلوگرم بر متر مربع لجن فاضلاب، SS2: تیمار ۲۰ کیلوگرم بر متر مربع لجن فاضلاب؛ در هر اندام گیاهی، حروف انگلیسی متفاوت تفاوت معنی‌دار آماری بین تیمارهای تحت بررسی را نشان می‌دهد؛ **معنی‌داری در سطح ۹۹ درصد؛ *معنی‌داری در سطح ۹۵ درصد؛ ns نبود تفاوت معنی‌دار آماری

Figure 3. Heavy metals concentrations of plant tissues in *P. alba* trees affected by sewage sludge treatments (means ± SE); SS0: Control treatment, SS1: 10 kg/m^2 of sewage sludge treatment, SS2: 20 kg/m^2 of sewage sludge treatment; in each tissue different letters indicate significant differences between treatments; ** $P \leq 0.01$, * $P \leq 0.05$, ns $P > 0.05$

بحث

بررسی ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی خاک عرصهٔ کاشت درختان صنوبر نشان داد که تیمار لجن فاضلاب بر مقدار کربن آلی و غلظت عناصر غذایی اصلی شامل نیتروژن، فسفر و سولفور و ریزمغذی‌های خاک شامل روی و مس تأثیر مثبت معنی‌داری داشت و برای همهٔ عنصرها بیشترین مقادیر در تیمار ۲۰ کیلوگرم بر متر مربع لجن فاضلاب مشاهده شد. براساس پژوهش‌ها، کوددهی خاک با لجن فاضلاب می‌تواند بر ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی، میکروبی و آنزیمی و همچنین سطح فلزات سنگین خاک مؤثر باشد (Singh & Agrawal, 2008; Dahiya et al., 2022; Ansari et al., 2022). یعنی اصلاح خاک با لجن فاضلاب می‌تواند ویژگی‌هایی از خاک از قبیل غلظت عناصر غذایی، مقدار مادهٔ آلی، تخلخل، تهویه، وزن مخصوص ظاهری، پایداری خاکدانه و ظرفیت نگهداشت آب را در خاک بهبود ببخشد (Roig et al., 2012; Camps-Sagué et al., 2024). Achkir et al. (2023) در پژوهش خود بیان کردند که در نتیجهٔ اصلاح خاک با لجن فاضلاب، مادهٔ آلی، کربن آلی و عناصر غذایی اصلی NPK در خاک افزایش یافت. همچنین Ferraz et al. (2016) با بررسی تأثیر کوددهی با لجن فاضلاب بر درختان اکالیپتوس (*E. grandis* W.Hill ex Maiden) و خاک گزارش کردند که کاربرد انواع مختلف لجن فاضلاب، حاصلخیزی خاک را به‌ویژه در عمق صفر تا ۵ سانتی‌متری خاک بهبود بخشید. یعنی با توجه به اینکه لجن فاضلاب نوعی کود آلی است، حاصلخیزی خاک پس از یک دوره استفاده طولانی ممکن است افزایش یابد (Archie & Smith, 1981). البته تغییرات ایجادشده در ویژگی‌های خاک، هم به ویژگی‌های خاک و لجن و مقدار کاربرد لجن و هم به اثرهای متقابل آنها و pH خاک وابسته است (Parkpain et al., 1998) و با توجه به تغییر ویژگی‌های لجن فاضلاب تحت تأثیر منبع تولید و همچنین تغییرات فصلی آن، تأثیر کوددهی با لجن فاضلاب بر ویژگی‌های خاک متغیر است.

از سوی دیگر، اصلاح خاک با لجن فاضلاب به‌ویژه زمانی که غلظت‌های زیادی از فلزات و ترکیبات سمی در لجن فاضلاب وجود داشته باشد، می‌تواند سبب افزایش سطح فلزات سنگین و سمی در خاک شود (Ansari et al., 2022). نتایج این پژوهش نشان داد که تیمار ۲۰ کیلوگرم بر متر مربع لجن فاضلاب سبب افزایش معنی‌دار غلظت برخی فلزات سنگین مانند نیکل، کروم و سرب در خاک شد. شایان ذکر است که با توجه به متوسط مقادیر جهانی گزارش شده برای این فلزات سنگین (Sayadi & Sayyed, 2011)، افزایش غلظت این فلزات در خاک اصلاح‌شده با لجن فاضلاب بیشتر از حد مجاز نبوده است. Nissim et al. (2018) نیز افزایش برخی فلزات سنگین در خاک در نتیجهٔ کوددهی با لجن فاضلاب را گزارش کرده‌اند. البته گزارش‌هایی مبنی بر نبود تغییر یا حتی کاهش غلظت برخی فلزات سنگین در خاک اصلاح‌شده با لجن فاضلاب وجود دارد (Korboulewsky et al., 2002; Žaltauskaitė et al., 2017). به‌عبارتی غلظت عناصر فلزی موجود در لجن فاضلاب تحت تأثیر عامل‌های متعددی شامل منبع فاضلاب تولیدی، فرایندهای تصفیهٔ فاضلاب و همچنین تصفیهٔ لجن است (Hue & Ranjith, 1994; Feng et al., 2023). در مقابل، زیست‌فراهمی عناصر فلزی لجن در خاک نیز بیشتر تحت تأثیر pH و مقدار مادهٔ آلی خاک و همچنین مقدار کاربرد لجن قرار می‌گیرد (McBride et al., 2004).

نتایج نشان داد که در فصل رویش اول کوددهی با لجن فاضلاب تأثیر معنی‌داری بر متغیرهای قطر برابرسینه، ارتفاع و حجم در هکتار درختان صنوبر نداشت. در فصل رویش دوم، قطر برابرسینه و میانگین حجم در هکتار درختان صنوبر در تیمارهای لجن فاضلاب به‌طور معنی‌داری بیشتر از تیمار شاهد بود. نبود تأثیر یا حتی کاهش عملکرد رشد درختان تیمارشده با لجن فاضلاب در تحقیق Kubátová et al. (2016) روی درختان بید و صنوبر در سال‌های نخست

استقرار نیز گزارش شده است که یکی از دلایل آن، ظهور علف‌های هرز در سال‌های اولیهٔ استقرار درختان بیان شده که می‌تواند عملکرد درختان تندرشد را تحت تأثیر قرار دهد (Clay & Dixon, 1997; Larsen et al., 2014). به‌عبارتی با ورود زیاد عناصر غذایی همراه با استفاده از پسماندهایی مانند فاضلاب‌ها و لجن فاضلاب در صنوبرکاری‌ها، احتمال پیدایش و هجوم علف‌های هرز وجود دارد (Minhas et al., 2022). از سوی دیگر، در سال‌های اولیه به‌طور معمول خاک از حاصلخیزی بیشتری برخوردار است، ولی با جذب عناصر غذایی توسط گیاهان و بازگشت کم مواد غذایی به خاک، با گذشت چند سال کاهش حاصلخیزی خاک رخ می‌دهد (Karltun et al., 2013)، بنابراین نبود تفاوت یا تفاوت کم بین تیمارهای کودی و شاهد در سال‌های نخست استقرار درختان دور از انتظار نیست. در مقابل، کوددهی با لجن فاضلاب بر متغیرهای قطر برابرسینه، ارتفاع و حجم در هکتار درختان صنوبر کبوده پس از گذشت سه سال تأثیر مثبت معنی‌داری داشت و برای همهٔ این متغیرها با وجود مقادیر بیشتر در تیمار ۲۰ کیلوگرم بر متر مربع لجن فاضلاب، بین دو تیمار لجن فاضلاب تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. مطابق نتایج حاضر، تأثیر مثبت کاربرد لجن فاضلاب بر عملکرد تولید درختان تندرشد در پژوهش‌های دیگر مانند Sevel et al. (2014) در درختان بید (*S. viminalis* × *S. schwerinii* E.L.Wolf)، Tsakou et al. (2003) در درختان صنوبر (*P. euramericana* (Dode) Guinier)، Silva et al. (2011)، Ferraz et al. (2016) و Soudani et al. (2017) در درختان اکالیپتوس (*E. grandis* و *E. camaldulensis*) گزارش شده است. کوددهی با لجن فاضلاب با بهبود خصوصیات فیزیکی-شیمیایی خاک، افزایش رشد و عملکرد گیاه را فراهم می‌کند (Boudjabi & Chenchouni, 2021). افزایش عملکرد گیاه تحت تأثیر افزایش غلظت عناصر غذایی ضروری برای گیاه مانند نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم و غیره، افزایش ریزمغذی‌هایی که به آهستگی در خاک رها می‌شوند و همچنین بهبود قابلیت جذب بسیاری از عناصر غذایی است که با کاربرد لجن فاضلاب در خاک ایجاد می‌شود (Singh & Agrawal, 2008; Soudani et al., 2017).

کوددهی با لجن فاضلاب سبب افزایش معنی‌دار غلظت عناصر غذایی نیتروژن و فسفر در اندام‌های ریشه، ساقه و برگ درختان صنوبر کبوده سه‌ساله شد. تأثیر کوددهی با لجن فاضلاب بر غلظت برخی عناصر غذایی کم‌مصرف شامل روی در اندام‌های ریشه، ساقه و برگ و مس در اندام‌های ریشه و برگ نیز معنی‌دار بود. کوددهی با لجن فاضلاب سبب افزایش معنی‌دار غلظت فلز نیکل در اندام‌های ریشه و برگ درختان صنوبر نیز شد. شایان ذکر است که غلظت عناصر غذایی و فلزات سنگین جذب‌شده در اندام‌های مختلف درختان صنوبر در دو تیمار لجن فاضلاب (۱۰ و ۲۰ کیلوگرم بر متر مربع) تفاوت معنی‌دار آماری نشان نداد. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که اصلاح خاک با لجن فاضلاب می‌تواند بر رشد، تولید زی‌توده، فنولوژی، فتوسنتز، غلظت عناصر غذایی، فلزات کمیاب و فلزات سنگین گیاه رشدیافته تأثیرگذار باشد (Pascual et al., 2008; Antolín et al., 2010; Soudani et al., 2017). افزایش سطح برخی عناصر غذایی در درختان صنوبر، بید و اکالیپتوس رشدیافته روی خاک اصلاح‌شده با لجن فاضلاب در دیگر پژوهش‌ها نیز گزارش شده است (Soudani et al., 2017; Guoqing et al., 2019). اما مقایسهٔ نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که الگوی تجمع عناصر و فلزات براساس نوع خاک، گونهٔ گیاهی، فنولوژی و اثرهای متقابل عناصر و فلزات متغیر است (Mahler et al., 1980; Singh & Agrawal, 2008). برای مثال در درختان صنوبر (*P. euramericana*)، اصلاح خاک با لجن فاضلاب تأثیری بر غلظت فلزات سنگین و عناصر غذایی بافت چوبی گیاه نداشت (Tsakou et al., 2003).

در صنوبرکاری‌ها و سیستم‌های بهره‌برداری کوتاه‌مدت، کنترل آفات و بیماری‌ها از موضوع‌های

مهمی است که باید لحاظ شود. محققان مختلف، آفات و بیماری‌ها را به‌عنوان تهدیدکننده و آسیب‌زننده‌های بالقوهٔ صنوبرکاری‌ها گزارش کرده‌اند (Babmorad et al., 2010; Nikdel & Dordaei, 2011). استفاده از فاضلاب و لجن فاضلاب در کشت‌وکارها با تأثیر بر عملکرد رشد و ترکیب شیمیایی اندام‌های گیاه می‌تواند بر مناسب شدن گیاه به‌عنوان میزبان آفات و بیماری‌ها تأثیرگذار باشد یا ممکن است ترکیب شیمیایی پسماند برای گیاه مناسب نباشد و گیاه را مستعد ابتلا به آفات و بیماری‌ها کند (Ahman & Wilson, 2008). بررسی تأثیر کوددهی با این نوع لجن فاضلاب بر شدت ابتلای درختان صنوبر کبوده به آفات و بیماری‌ها در پژوهش Salehi et al. (2024) گزارش شده است. نتایج نشان داد که کاربرد لجن فاضلاب در خاک تأثیری بر افزایش یا کاهش ابتلا درختان صنوبر کبوده به آفات و بیماری‌ها نداشته است. Ahman (2001) و Panasiewicz et al. (2019) نیز با بررسی درختان بید (*S. viminalis*) کوددهی‌شده با فاضلاب یا لجن فاضلاب گزارش کردند که این نوع کوددهی تأثیر منفی بر ابتلای درختان به آفات نداشته است. Guoqing et al. (2019) نیز با بررسی تأثیر کاربرد لجن فاضلاب کمپوست‌شده بر یک تودهٔ صنوبرکاری، طغیان آفت یا بیماری خاصی را روی درختان تحت بررسی گزارش نکردند.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد که کوددهی با لجن فاضلاب، افزایش عملکرد تولید در هکتار درختان صنوبر کبوده سه‌ساله را در پی داشت و دو تیمار ۱۰ و ۲۰ کیلوگرم بر متر مربع لجن فاضلاب تفاوت معنی‌داری از این نظر نشان ندادند. از سوی دیگر، تیمار ۲۰ کیلوگرم بر متر مربع لجن فاضلاب سبب افزایش سطح برخی فلزات سنگین (نیکل، کروم و سرب) در خاک نسبت به تیمار شاهد شد. بنابراین تا این مرحله از پژوهش می‌توان پیشنهاد داد که برای صنوبرکاری با درختان کبوده در شرایط مشابه با پژوهش حاضر، کوددهی با تیمار ۱۰ کیلوگرم بر متر مربع لجن فاضلاب توصیه می‌شود. شایان ذکر است که با توجه به دورهٔ بهره‌برداری حداقل شش تا هشت ساله برای صنوبرکاری‌ها، برای ارائهٔ نتایج معتبرتر باید تأثیر کوددهی در سال‌های آینده نیز از جنبه‌های مختلف شامل تأثیر بر ویژگی‌های خاک و عملکرد رویشی درختان صنوبر بررسی شود.

سپاسگزاری

از داوران محترم مقاله، مؤسسهٔ تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور و نیز شرکت فاضلاب استان تهران که حمایت مالی این پژوهش را بر عهده داشتند سپاسگزاری و تقدیر می‌شود.

References

Achkir, A., Aouragh, A., El Mahi, M., Lotfi EI.M., Labjar, N., EL Bouch, M., Ouahidi, M.L., Badza, T., Farhane, H., & EL Moussaoui, T. (2023). Implication of sewage sludge increased application rates on soil fertility and heavy metals contamination risk. *Emerging Contaminants*, *9*(1), 100200. doi: 10.1016/j.emcon.2022.100200

Ahman, I. (2001). Management of pests and diseases in biomass willow. *Journal of the Swedish Seed Association, 111*, 98-103.

Ahman, I., & Wilson, F. (2008). Symptoms of pests, rust and other disorders on leaves of willow fertilised with wastewater, urine or sewage sludge. *Biomass and Bioenergy*, *32*, 1001-1008. doi: 10.1016/j.biombioe.2008.01.023

Ansari, M.S., Tauseef, A., Haris, M., Khan, A., Hussain, T., & Khan, A.A. (2022). Effects of heavy metals present in sewage sludge, their impact on soil fertility, soil microbial activity, and environment. *Development in Waste Water Treatment Research and Processes*, 197-214. doi: 10.1016/B978-0-323-85584-6.00013-3

Antolín, M.C., Muro, I., & Sánchez-Díaz, M. (2010). Application of sewage sludge improves growth, photosynthesis and antioxidant activities of nodulated alfalfa plants under drought conditions.

Environmental and Experimental Botany, *68*(1), 75-82. doi: 10.1016/j.envexpbot.2009.11.001

Archie, S.G., & Smith, M. (1981). *Survival and growth of plantations in sewage sludge treated soil and older forest growth study*. In: Bledose, C.B. (Ed.), Municipal Sludge Application to Pacific North-West forest lands. University of Washington, College of Forest Resources, Washington, DC, pp. 105-13.

Babmorad, M., Azizkhani, E., & Zeinali, S. (2010). Poplar pssylid, *Camarotoscena fulgidipennis Loginova* (Hom.: Psyllidae) damage on poplar species and clones in Karaj, Iran. *Iranian Journal of Forest and Range Protection Research*, *8*(2), 119-127. (In Persian)

Baran, A., Cayci, G., Kutak, C., & Hartmann R. (2001). The effect of grape mare as growing medium on growth of hypostases plant. *Biosolid-Technology*, *78*, 103-106.

Boudjabi, S., & Chenchouni, H. (2021). On the sustainability of land applications of sewage sludge: How to apply the sewage biosolid in order to improve soil fertility and increase crop yield? *Chemosphere*, *282*, 131122. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131122

Bouyoucos, G.J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agronomy Journal*, *54*(5), 464-465.

Bremner, J.M. (1996). *Nitrogen-total*: 1085-1121. In: Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., Loeppert, R.H., Soltanpour, P.N., Tabatabai, M.A., … and Sumner, M.E. (Eds.). Methods of Soil Analysis, Part 3: Chemical Methods. Soil Science Society of America, Inc., American Society of Agronomy, Inc., Madison, Wisconsin.

Camps-Sagué, F., Bosch-Serra, À.D., Cifuentes-Almeida, A.D., Boixadera-Bosch, M.M., & Domingo-Olivé, F. (2024). Long-term amendment with sewage sludge: effects on nutrient value and trace-metal content in different parts of maize plants. *Applied Sciences, 14*(18), 8105. doi: 10.3390/app14188105

Clay, D.V., & Dixon, F.L. (1997). Effect of ground-cover vegetation on the growth of poplar and willow short-rotation coppice. *Aspects of Applied Biology*, *49*, 53-60.

Dahiya, P., Singh, N., & Singh, A. (2022). Impact of sewage sludge application on microbial diversity and fertility of soil: A long-term study. *Development in Waste Water Treatment Research and Processes*, 91-106. doi: 10.1016/B978-0-323-85584-6.00006-6

Feng, J., Burke, I.T., Chen, X. & Stewart, D.I. (2023). Assessing metal contamination and speciation in sewage sludge: implications for soil application and environmental risk. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, *22*, 1037-1058. doi: 10.1007/s11157-023-09675-y

Ferraz, A.V., Momentel, L.T., & Poggiani, F. (2016). Soil fertility, growth and mineral nutrition in *Eucalyptus grandis* plantation fertilized with different kinds of sewage sludge. *New Forests*, *47*, 861-876. doi: 10.1007/s11056-016-9549-1

Guoqing, X., Xiuqina, C., Lipingb, B., Hongtaob, Q., & Haibob, L. (2019). Absorption, accumulation and distribution of metals and nutrient elements in poplars planted in land amended with composted sewage sludge: A field trial. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *182*, 1-10. doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.06.043

Hue, N.V., & Ranjith, S.A. (1994). Sewage sludges in Hawaii: chemical composition and reactions with soils and plants. *Water, Air, & Soil Pollution*, *72*, 265-283. doi: 10.1007/BF01257129

Karltun, E., Lemenih, M., & Tolera, M. (2013). Comparing farmers' perception of soil fertility change with soil properties and crop performance in Beseku, Ethiopia. *Land Degradation and Development, 24*(3), 228-35. doi: 10.1002/ldr.1118

Korboulewsky, N., Dupouyet, S., & Bonin, G. (2002). Environmental risks of applying sewage sludge compost to vineyards: carbon, heavy metals, nitrogen, and phosphorous accumulation. *Journal of Environmental Quality*, *31*, 1522-1527. doi: 10.2134/jeq2002.1522

Kubátová, P., Hejcman, M., Száková, J., Vondráčková, S., & Tlustoš, P. (2016). Effects of sewage sludge application on biomass production and concentrations of Cd, Pb and Zn in Shoots of *Salix* and

Populus Clones: Improvement of phytoremediation efficiency in contaminated soils. *BioEnergy Research*, *9*, 809-819. doi: 10.1007/s12155-016-9727-1

Kulling, D., Stadelmann, F., & Herter, U. (2001). Sewage Sludge – Fertilizer or Waste? UKWIR Conference, Brussels.

Larsen, S.U., Jørgensen, U., & Lærke, P.U. (2014). Willow yield is highly dependent on clone and site. *BioEnergy Research, 7*, 1280-1292. doi: 10.1007/s12155-014-9463-3

Mahler, R.J., Bingham, F.T., Sposito, G., & Page, A.L. (1980). Cadmium enriched sewage sludge application to acid and calcareous soils, relation between treatment, Cd in saturated extracts and Cd treatment. *Journal of Environmental Quality*, *9*, 359-364. doi: 10.2134/jeq1980.00472425000900030006x

McBride, M.B., Richards, B.K., & Steenhuis, T. (2004). Bioavailability and crop uptake of trace elements in soil columns amended with sewage sludge products. *Plant Soil*, *262*, 71-84. doi: 10.1023/B:PLSO.0000037031.21561.34

Mclean, E.O. (1982). *Soil pH and lime requirement*: 199-224. 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.

Minhas, P.S., Saha, J.K., Dotaniya, M.L., Sarkar, A., & Saha, M. (2022). Wastewater irrigation in India: Current status, impacts and response options. *Science of the Total Environment*, *808*, 152001. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152001

Nelson, D.W., & Sommers, L.E. (1996). *Total carbon, organic carbon, and organic matter*: 961-1010. In: Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., Loeppert, R.H., Soltanpour, P.N., Tabatabai, M.A., … and Sumner, M.E. (Eds.). Methods of Soil Analysis, Part 3: Chemical Methods. Soil Science Society of America, Inc., American Society of Agronomy, Inc., Madison, Wisconsin.

Nikdel, M., & Dordaei, A. (2011). Antixenosis resistance of different poplar clones to three important pests in East Azarbaijan, Iran. *Journal of Iranian Plant Protection Research*, *24*(4), 481-488. doi: 10.22067/jpp.v24i4.8143 (In Persian)

Nissim, W.G., Cincinelli, A., Martellini, T., Alvisi, L., Palm, E., Mancuso, S., & Azzarello, E. (2018). Phytoremediation of sewage sludge contaminated by trace elements and organic compounds. *Environmental Research*, *164*, 356-366. doi: 10.1016/j.envres.2018.03.009

Panasiewicz, K., Niewiadomska, A., Sulewska, H., Wolna-Maruwka, A., Borowiak, K., Budka, A., & Ratajczak, K. (2019). The effect of sewage sludge and BAF inoculant on plant condition and yield as well as biochemical and microbial activity of soil in willow (*Salix viminalis* L.) culture as an energy crop. *PeerJ*, *7*, e6434. doi: 10.7717/peerj.6434

Parkpain, P., Sirisukhodom, S., & Carbonell-Barrachina, A.A. (1998). Heavy metals and nutrients chemistry in sewage sludge amended Thai soils. *Journal of Environmental Science and Health*, *33*, 573-597. doi: 10.1080/10934529809376749

Pascual, I., Avilés, M., Aguirreolea, J. & Sánchez-Díaz, M. (2008). Effect of sanitized and non-sanitized sewage sludge on soil microbial community and the physiology of pepper plants. *Plant Soil*, *310*, 41-53. doi: 10.1007/s11104-008-9626-0

Pozesh shirazi, M., Samavat, S., Zolfi Bavariani, M., Fakhri, F., & Moradi, G. (2012). Effects of organic matter from different sources on soil physico-chemical properties and crop yield in Boushehr province. *Iranian Journal of Soil Research*, *25*(4), 285-293. doi: 10.22092/ijsr.2012.126493 (In Persian)

Pulford, I.D., & Dickinson, N.M. (2005). *Phytoremediation technologies using trees*. In: Prassad MNV, Naidu R [eds.], Trace elements in the environment, 375-395. CRC Press, New York.

Rhoades, J.D. (1982). *Soluble salts*: 167-179. 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.

Roig, N., Sierra, J., Martí, E., Nadal, M., Schuhmacher, M., & Domingo, J.L. (2012). Long-term amendment of Spanish soils with sewage sludge: Effects on soil functioning. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *158*, 41-48. doi: 10.1016/j.agee.2012.05.016

Salehi, A., & Ahmadloo, F. (2022). Study on the performance of two white poplar clones grown in heavy-metal contaminated soil and irrigated with municipal effluent. *Iranian Journal of Forest*, *14*(2), 119-133. doi: 10.22034/ijf.2022.284216.1781 (In Persian)

Salehi, A., & Shariat, A. (2024). Comparative performance of *Populus* spp. and *Salix* spp. for growth, nutrition, and heavy metal uptake in a wastewater hydroponic system. *International Journal of Phytoremediation*, *26*(9),1369-1378. doi: 10.1080/15226514.2024.2321597

Salehi, A., Calagari, M., Ahmadloo, F., Sayadi, M.H.J., & Tafazoli, M. (2022). Productivity of *Populus nigra* L. in two different soils over five rotations. *Acta Ecologica Sinica*, *42*(4), 332-337. doi: 10.1016/j.chnaes.2022.02.002

Salehi, A., Farahani, S., & Zamani, S.M. (2024). Impact of fertilization with sewage sludge on pests and diseases of poplar trees. *Iranian Journal of Forest and Range Protection Research*, *22*(2): 239-253. doi: 10.22092/ijfrpr.2024.365806.1623 (In Persian)

Salehi, A., Zalesny, R.S., & Calagari, M. (2023). Effects of urban wastewater application on growth, biomass, nutrition, and heavy-metal accumulation of *Populus nigra* L. "62/154," *P. alba* L. "20/45," *P. euramericana* (Dode) Guinier "92/40," and *Salix excelsa* S.G. Gmel grown in heavy-metal contaminated soil. *International Journal of Phytoremediation*, *25*(10), 1371-1383. doi:10.1080/15226514.2022.2158783

Sayadi, M.H., & Sayyed, M.R.G. (2011). Comparative assessment of baseline concentration of the heavy metals in the soils of Tehran (Iran) with the comprisable reference data. *Environmental Earth Sciences*, *63*, 1179-1188. doi: 10.1007/s12665-010-0792-z

Sevel, L., Nord-Larsen, T., Ingerslev, M., Jørgensen, U., & Raulund-Rasmussen, K. (2014). Fertilisation of SRC willow: I. Biomass production response. *BioEnergy Research, 7*, 319-328. doi: 10.1007/s12155-013-9371-y

Silva, P.H.M., Poggiani, F., & Laclau, J.P. (2011). Applying sewage sludge to *Eucalyptus grandis* Plantations: Effects on biomass production and nutrient cycling through litterfall. *Applied and Environmental Soil Science*, *2011*, 1-11. doi: 10.1155/2011/710614

Singh, R.P., & Agrawal, M. (2008). Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. *Waste Management*, *28*, 347-358. doi: 10.1016/j.wasman.2006.12.010

Soudani, L., Mhameda, M., Hermann, H., Mykola, Kh., Oliver, W., Christin, M., Elena, O., & Nadiaa, B. (2017). Fertilization value of municipal sewage sludge for *Eucalyptus camaldulensis* plants. *Biotechnology Reports*, *13*, 8-12. doi: 10.1016/j.btre.2016.12.001

Tsakou, A., Roulia, M., & Christodoulakis, 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 Toxicology*, *71*, 330-337. doi: 10.1007/s00128-003-0168-0

Utmazian, M.N.D., Wieshammer, G., Vega, R., & Wenzel, W.W. (2007). Hydroponic screening for metal resistance and accumulation of cadmium and zinc in twenty clones of willows and poplars. *Environmental Pollution*, *148*, 155-165. doi: 10.1016/j.envpol.2006.10.045

Žaltauskaitė, J., Judeikytė, S., Sujetovienė, G. & Dagiliūtė, R. (2017). Sewage Sludge Application Effects to First Year Willows (*Salix Viminalis* L.) Growth and Heavy Metal Bioaccumulation. *Waste and Biomass Valorization, 8*, 1813-1818. doi: 10.1007/s12649-016-9691-1

Zobeiri, M. (2005). *Forest Inventory* (*Measurement of Tree and Forest*), Tehran University Press, Tehran, Iran. (In Persian)

Iranian Journal of Forest
Vol. 17, No. 2, Summer 2025
pp. 211-224
Research Article

DOI: 10.22034/ijf.2025.493216.2024
CC BY 4.0

Effects of sewage sludge fertilization on soil properties and growth responses of three-year-old *Populus alba* trees

A. Salehi[1*], S. Teimouri[2], and P. Ghadiripour[3]

[1]Assistant Prof., Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran
[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: 23 December 2024; Accepted: 13 January 2025)

Abstract

Introduction: In tree plantations, like other agricultural activities, the use of chemical and organic fertilizers can lead to an increase in wood production. Sewage sludge, as an important by-product resulting from wastewater treatment processes, is a type of organic waste that can increase the organic matter and the concentration of the macro and micro nutrients in the soil, and play a significant role in improving plant growth and performance. Considering safe and sustainable disposal of sewage sludge is one of the important environmental concerns, and as well as improving the physico-chemical properties of soil, the present study aims to investigate the effect of application of the sewage sludge from South Wastewater Treatment Plant of Tehran on soil properties and performance of three-year poplar trees (*Populus alba* L. "20/45").

Material and Methods: The present study was carried out in a completely randomized block design, with three treatments of sewage sludge (0, 10, and 20 kg m^{-2}) and three plots 16 m^2 (9 trees in each plot with planting spacing: 2×2 m) in each block, in the Alborz Research Center of Research Institute of Forests and Rangelands, Tehran, Iran. At the end of each growing season, the growth and increment variables (height and diameter at breast height) of all trees were measured and wood production was calculated. In the middle of the third growing season, tree (root, stem and leaf) and soil samples were taken from each treatment in three replicates. In the laboratory, the physico-chemical properties of soil and nutrients and concentration of heavy metals in tree organs were determined.

Results: Fertilization with sewage sludge had a significant positive effect on the organic matter and the concentration of nitrogen (N), phosphorus (P), sulfur (S), zinc (Zn) ($P \leq 0.01$) and copper (Cu) ($P \leq 0.05$) in the soil. So that in the treatment of 20 kg $m^{-2}$of sewage sludge, soil organic carbon showed an increase of 381.8% compared to the control soil. Likewise, the treatment of 20 kg $m^{-2}$of sewage sludge led to a significant increase in the concentrations of some heavy metals such as nickel (Ni), chromium (Cr) ($P \leq 0.05$) and lead (Pb) ($P \leq 0.01$) in the soil. The results showed that sewage sludge application had a positive significant impact on growth performance of poplar trees. So that the treatment of 20 kg $m^{-2}$of sewage sludge led to an increase of 19, 20 and 63.5% in diameter, height, and volume per hectare of poplar trees, respectively, compared to the control treatment. The analysis of plant samples showed that sewage sludge application significantly increased the concentration of N, P and Zn ($P \leq 0.01$) in root, stem and leaf and Cu and Ni ($P \leq 0.05$) in root and leaf of poplar trees.

Conclusion: Considering an increasing growth performance of three-year-old poplar trees in the soil fertilized with sewage sludge and no significant differences between the applied levels of sewage sludge, and increasing level of some heavy metals in the treatment of 20 kg $m^{-2}$of sewage sludge, this study suggests that a reasonable rate (10 kg m^{-2}) of sludge application can provide soil amendment and additional nutrients for fast-growing trees without any threat to the food chain and pollution of soil by heavy metals. Of course, considering a rotation of six to eight years for poplar plantations, it is necessary to investigate the effect of sewage sludge application at least until the end of the sixth year on soil characteristics and growth performance of poplar trees.

Keywords: Heavy metals, Nutrients, Organic waste, Soil amendment, Wood production.

[*]Corresponding author Tel: +98 9128355662 Email: az.salehi@rifrac.ir