



University of Tehran

Growth performance of three-year-old *Populus nigra* L. trees under soil amendment with sewage sludge

Azadeh Salehi^{1*} | Rafaatollah Ghasemi²

1. Corresponding Author, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran. Email: az.salehi@rifr-ac.ir

2. Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran. Email: ghassemi@rifr-ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:
Received: 05 January 2025
Revised: 11 February 2025
Accepted: 14 May 2025
Published online: 17 June 2025

Keywords:
Fertilization,
Heavy metals,
Nutrients,
Organic waste,
Poplar plantation.

ABSTRACT

Sewage sludge, as an organic waste, can be used in poplar plantations to increase soil organic matter and nutrient levels, thereby enhancing productivity per unit area. This study investigated the effects of sewage sludge application at three levels (0, 10, and 20 kg m⁻²) on the growth performance of three-year-old *Populus nigra* "62/154" trees and soil properties. Over a three-year period, at the end of each growing season, growth variables including diameter at breast height and total height were measured, and wood production was calculated. In the middle of the third growing season, soil and plant samples (root, stem, and leaf) were collected from each treatment in three replicates. In the laboratory, physicochemical properties of the soil as well as concentrations of nutrients and heavy metals in plant organs were analyzed. Results showed that soil amendment with sewage sludge significantly increased organic matter and concentrations of key macro- and micronutrients (N, P, S, Cu, Zn) in the soil. The 20 kg m⁻² treatment also led to a significant increase in the concentration of some heavy metals, including nickel (Ni), chromium (Cr), and lead (Pb). In sludge-amended soils, growth performance of poplar trees and uptake of certain nutrients (N, P, Zn, Cu) and heavy metals (particularly Ni) were significantly higher compared to the control. However, no significant difference was observed between the 10 and 20 kg m⁻² treatments. Based on improved tree growth and the elevated levels of heavy metals in the higher-dose treatment, the application of 10 kg m⁻² sewage sludge is recommended for poplar plantations under similar conditions.

Cite this article: Salehi, A., Ghasemi, R. (2025). Growth performance of three-year-old *Populus nigra* L. trees under soil amendment with sewage sludge. *Journal of Forest and Wood Products*, 78 (1), 51-62. DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2025.387986.1323>



© The Author(s) **Publisher:** University of Tehran Press.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2025.387986.1323>



دانشگاه تهران

نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۰۵۳۰

سایت نشریه: <https://jfwf.ut.ac.ir>

عملکرد رویشی درختان صنوبر تبریزی (*Populus nigra*) سه‌ساله تحت تأثیر اصلاح خاک با لجن فاضلاب

آزاده صالحی^{۱*} | رفعت‌اله قاسمی^۲

۱. نویسنده مسئول، موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، ترویج و آموزش کشاورزی، تهران، ایران. رایانامه: az.salehi@rifr-ac.ir

۲. موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، ترویج و آموزش کشاورزی، تهران، ایران. رایانامه: ghassemi@rifr-ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

لجن فاضلاب به‌عنوان یک پسماند آلی، می‌تواند در زراعت چوب به‌منظور بهبود سطح عناصر غذایی و مواد آلی خاک و در نتیجه افزایش تولید در واحد سطح مورد استفاده قرار گیرد. در این پژوهش، تأثیر کوددهی با لجن فاضلاب (در سه سطح ۰، ۱۰ و ۲۰ کیلوگرم بر مترمربع) بر عملکرد رویشی درختان صنوبر تبریزی (*Populus nigra* L.) سه‌ساله و ویژگی‌های خاک بررسی شد. بدین‌منظور، به‌مدت سه سال در پایان هر فصل رویش در هر تیمار لجن فاضلاب، متغیرهای رویشی (قطر برابر سینه و ارتفاع کل) درختان صنوبر اندازه‌گیری و عملکرد تولید چوب محاسبه گردید. در اواسط فصل رویش سوم، با جمع‌آوری نمونه‌های گیاهی (ریشه، ساقه و برگ) و خاک، ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک و غلظت عناصر غذایی و فلزات سنگین اندام‌های گیاهی تعیین شد. نتایج نشان داد که اصلاح خاک با لجن فاضلاب افزایش معنی‌دار ماده آلی و سطح عناصر غذایی نیتروژن، فسفر، سولفور، مس و روی را در خاک به‌دنبال داشت. همچنین تیمار ۲۰ کیلوگرم بر مترمربع لجن فاضلاب منجر به افزایش معنی‌دار غلظت برخی فلزات سنگین نظیر نیکل، کروم و سرب در خاک نسبت به تیمار شاهد شد. در خاک اصلاح‌شده با لجن فاضلاب، متغیرهای رویشی درختان صنوبر و جذب برخی عناصر غذایی (نیتروژن، فسفر، روی و مس) و فلزات سنگین (نیکل) در اندام‌های گیاهی به‌طور معنی‌داری بیشتر از تیمار شاهد بود، اما بین دو تیمار لجن فاضلاب تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. برای زراعت چوب با صنوبر تبریزی در شرایطی مشابه با شرایط پژوهش حاضر، کوددهی با تیمار ۱۰ کیلوگرم بر مترمربع لجن فاضلاب توصیه می‌شود.

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۳/۲۳

کلیدواژه:

پسماند آلی،

زراعت چوب،

عناصر غذایی،

فلزات سنگین،

کود.

استناد: صالحی؛ آزاده، قاسمی؛ رفعت‌اله (۱۴۰۴). عملکرد رویشی درختان صنوبر تبریزی (*Populus nigra*) سه‌ساله تحت تأثیر اصلاح خاک با لجن فاضلاب. نشریه جنگل و

فرآورده‌های چوب، ۷۸ (۱)، ۵۱-۶۲. DOI: <https://doi.org/10.22059/jfwf.2025.387986.1323>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

<https://doi.org/10.22059/jfwf.2025.387986.1323>



۱. مقدمه

لجن فاضلاب‌های شهری و خانگی به‌عنوان یک کود آلی از دیرباز جایگاه ویژه‌ای در کشاورزی داشته و استفاده از آن برای افزایش سطح عناصر غذایی پر مصرف و کم مصرف و مواد آلی خاک به‌جای کودهای شیمیایی که استفاده از آنها مشکلات محیط‌زیستی فراوانی را به‌دنبال خواهد داشت، مورد توجه بوده است. قیمت ارزان و در دسترس بودن لجن فاضلاب از یک‌سو و مزایای مثبت آن از سوی دیگر، استفاده از این نوع پسماند آلی را به‌عنوان کود در کشاورزی توجیه می‌کند. لجن فاضلاب تولیدی در تصفیه‌خانه‌ها ناشی از فرآیند تصفیه فاضلاب، با تأثیرگذاری بر ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک نظیر سطح عناصر غذایی، درصد ماده آلی، تخلخل، تهویه، ظرفیت نگهداشت آب در خاک و غیره، می‌تواند بر رشد و عملکرد تولیدی گیاه نقش مهمی داشته باشد [۱]. همچنین، نظر به افزایش سطح عناصر غذایی و مواد آلی در خاک در نتیجه اصلاح آن با لجن فاضلاب، افزایش فعالیت‌های زیستی و آنزیمی و همچنین تولید زی‌توده میکروبی در خاک اتفاق خواهد افتاد [۲]. درواقع، با توجه به اینکه لجن فاضلاب نوعی کود آلی است، حاصلخیزی خاک پس از یک دوره استفاده طولانی‌مدت می‌تواند افزایش یابد [۳]. از سوی دیگر، لجن فاضلاب می‌تواند دارای غلظت‌های بالایی از فلزات سنگین و سمی باشد، در نتیجه اصلاح خاک با آن، آلودگی خاک را به‌همراه خواهد داشت. در نتیجه آلودگی خاک و انتقال این آلودگی به زنجیره غذایی، مسلماً سلامت موجودات زنده با خطر جدی مواجه خواهد شد [۴]. بنابراین کشت محصولات کشاورزی در خاک‌های کوددهی شده با لجن فاضلاب باید با درنظر گرفتن ملاحظات محیط‌زیستی باشد.

یکی از کاربردهای لجن فاضلاب که در دهه‌های اخیر رواج پیدا کرده است، استفاده از آن در زراعت چوب و جنگلکاری‌ها به‌منظور افزایش تولید در واحد سطح است. توسعه زراعت چوب با گونه‌های تند رشد در کشور می‌تواند علاوه بر تأمین نیازهای داخلی صنایع و کارخانه‌های چوبی از تخریب جنگل‌ها نیز به‌شدت جلوگیری نماید. افزایش تولید در واحد سطح در زراعت چوب از اهمیت اقتصادی زیادی برخوردار است، به‌طوری‌که بتوان از زمین زیرکشت در مدت زمان مورد انتظار، بیشترین برداشت چوب و در نتیجه بالاترین بازده اقتصادی را داشت. این امر، از طریق انتخاب کلن‌های پربازده و افزایش حاصلخیزی خاک با استفاده از اصلاح و تقویت‌کننده‌های خاک امکان‌پذیر است. درواقع، در زراعت چوب مانند سایر فعالیت‌های زراعی مصرف انواع کودهای شیمیایی و آلی می‌تواند منجر به افزایش تولید در واحد سطح شود. با توجه به تولید مقادیر زیادی لجن در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، از این پسماند آلی ارزان‌قیمت می‌توان با درنظر گرفتن احتیاط‌ها و استانداردهای لازم در زراعت چوب و جنگلکاری‌ها به‌منظور بهبود سطح عناصر غذایی و مواد آلی خاک استفاده کرد. اصلاح خاک با لجن فاضلاب می‌تواند افزایش تولید چوب و بازده اقتصادی در واحد سطح، کاهش استفاده از کودهای شیمیایی ناسازگار با محیط‌زیست و مدیریت و دفع ایمن و ارزان‌قیمت لجن فاضلاب تولیدی را به‌همراه داشته باشد. در زراعت چوب، گونه‌های درختی تند رشد شامل اکالیپتوس‌ها (*Eucalyptus spp.*) صنوبرها (*Populus spp.*) و بیدها (*Salix spp.*) به‌عنوان گونه‌های تجاری مهم با اهداف چند منظوره [۵]، می‌توانند گزینه‌های مهمی برای کشت‌وکار در خاک‌های اصلاح‌شده با فاضلاب و یا لجن فاضلاب باشند [۶]. از آنجا که مشکل مرتبط با کاربرد لجن فاضلاب زمانی ایجاد می‌شود که حاوی غلظت‌های بالایی از فلزات سنگین و سمی باشد، با توجه به پتانسیل گیاه‌پالایی گونه‌های درختی تند رشد [۷، ۸، ۹، ۱۰] و عدم ورود مستقیم این گیاهان به چرخه غذایی انسان، در صورت آلوده شدن خاک به آلاینده‌ها می‌توان به اهداف پالایش خاک نیز دست یافت.

مطالعات انجام‌شده در زمینه تأثیر کوددهی خاک با لجن فاضلاب در زراعت چوب و جنگلکاری در داخل کشور اندک بوده و اغلب گزارش‌های موجود در این زمینه بر روی محصولات کشاورزی است. از طرف دیگر، با توجه به ضرورت مدیریت و دفع مناسب لجن فاضلاب تولیدی در تصفیه‌خانه‌های متعدد و بهبود ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک در نتیجه کوددهی خاک با لجن فاضلاب، طی یک مطالعه عرصه‌ای تأثیر اصلاح خاک با لجن فاضلاب تولیدی در تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران بر روی عملکرد رویشی درختان صنوبر تبریزی (*Pinus nigra* “62/154”) و ویژگی‌های خاک پس از گذشت سه سال بررسی شد.

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲-۱. روش پژوهش

پژوهش حاضر، در ایستگاه تحقیقاتی البرز مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور انجام شد. بدین‌منظور، در ابتدا لجن فاضلاب

خشک از تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران تهیه و به محل اجرای پروژه منتقل شد. مشخصات فیزیکی-شیمیایی لجن مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۱ ارائه شده است. سپس زمینی مناسب کشت صنوبر از نظر خاک و دسترسی به منابع آبی در اواخر بهمن سال ۱۳۹۸ آماده‌سازی (شخم، دیسک، تسطیح و حفر گودال) شد. در اواسط اسفند، نهال‌های همگن از کلن صنوبر تبریزی ("62/154" *P. nigra*) با فواصل ۲×۲ متر کاشته شد. در زمان کاشت نهال‌ها، تیمار لجن فاضلاب در سه سطح شامل ۰، ۱۰ و ۲۰ کیلوگرم بر مترمربع در قالب طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی (سه بلوک) با سه پلات (۱۶ مترمربعی) (تعداد نهال در هر پلات: ۹ پایه) در هر بلوک بر روی بستر کاشت (به‌صورت چال کود در اطراف هر درخت) اعمال شد. آبیاری عرصه در طول انجام پروژه با سیستم قطره‌ای و دور آبیاری یکبار در هفته انجام گردید. در طول اجرای پروژه، عملیات داشت و آبیاری عرصه به‌صورت کاملاً یکسان برای تمام تیمارها انجام شد. شایان ذکر است که عملیات کوددهی درختان صنوبر با لجن فاضلاب به‌صورت یکسال در میان براساس تیمارهای ذکرشده انجام گردید.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی-شیمیایی لجن مورد استفاده

پارامتر	لجن فاضلاب	استاندارد EPA	پارامتر	لجن فاضلاب	استاندارد EPA
نیترژن (درصد)	۳/۶۹	-	کادمیم (میلی گرم بر کیلوگرم)	۱/۹۸	۳۹
فسفر (میلی گرم بر کیلوگرم)	۲۳/۸۳	-	کبالت (میلی گرم بر کیلوگرم)	۱۶/۲	۱۵۰۰
پتاسیم (میلی گرم بر کیلوگرم)	۳۲۸	-	کروم (میلی گرم بر کیلوگرم)	۲۵۹	۱۲۰۰
آهن (میلی گرم بر کیلوگرم)	۲۷۹۰	-	آرسنیک (میلی گرم بر کیلوگرم)	۲۶/۰۵	۴۱
روی (میلی گرم بر کیلوگرم)	۱۲۸۴	۲۸۰۰	سرب (میلی گرم بر کیلوگرم)	۲۳۵	۳۰۰
مس (میلی گرم بر کیلوگرم)	۲۹۰	۱۵۰۰	نیکل (میلی گرم بر کیلوگرم)	۱۵۸/۷۹	۴۲۰
کلیرم‌های مدفوعی	۱۲۷	<۱۰۰۰	باکتری سالمونلا	۰	<۳
(بیشترین تعداد محتمل در هر گرم نمونه)			(بیشترین تعداد محتمل در هر گرم نمونه)		

۲-۲. اندازه‌گیری متغیرهای کمی و کیفی درختان صنوبر

در پایان هر فصل رویش به مدت سه سال متغیرهای رویشی (قطر برابر سینه و ارتفاع کل) کلیه درختان در هر تیمار لجن فاضلاب اندازه‌گیری و ثبت شد و در نهایت عملکرد تولید چوب درختان صنوبر در تیمارهای مختلف با محاسبه حجم تک درخت (رابطه ۱) [۱۱] و حجم در هکتار (تعداد درختان در هکتار با توجه به فاصله کاشت: ۲۵۰۰ اصله درخت) تعیین گردید (رابطه ۱).

$$V = 0.4 \times d^2 \times h \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این رابطه، V : حجم هر اصله درخت (مترمکعب)، d : قطر برابر سینه (متر) و h : ارتفاع کل درخت (متر) است.

۲-۳. بررسی نمونه‌های خاک و گیاه

در اواسط فصل رویش سوم، نمونه‌های گیاهی (ریشه، ساقه و برگ) و نمونه‌های خاک از هر تیمار در سه تکرار (هر تکرار ترکیبی از سه نمونه در هر تیمار بود) جمع‌آوری و به آزمایشگاه منتقل شد. پس از آماده‌سازی اولیه نمونه‌های خاک و گیاه، نمونه‌های گیاهی به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد خشک و سپس آسیاب شدند. در نمونه‌های خاک، گیاه (ریشه، ساقه و برگ) و لجن، نیترژن به‌روش کج‌لدال [۱۲] 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 HNO₃ به‌نسبت ۳ به ۱) در دستگاه هضم میکروویو (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 ماده مرجع استاندارد GSB-11- Citrus leaves (Institute for Reference) و NCS ZC73018, China National Analysis Centre for Iron and Steel) CD281- Rey Grass (Institute for Reference)

CRM059-Trace و در نمونه‌های خاک از ماده مرجع استاندارد (Materials and Measurements, European Commission) Metals-Loamy Clay 2 (Sigma-Aldrich, USA) استفاده شد. همچنین، مشخصات فیزیکی-شیمیایی نمونه‌های خاک و لجن شامل بافت به روش هیدرومتری [۱۳]، اسیدیته (pH) در عصاره گل اشباع [۱۴]، هدایت الکتریکی (EC) در عصاره گل اشباع [۱۵] و ماده آلی به روش والکلی-بلاک [۱۶] اندازه‌گیری شد.

۲-۴. تجزیه و تحلیل داده‌ها

تجزیه و تحلیل داده‌های پژوهش حاضر در نرم‌افزار آماری SPSS نسخه ۲۶ انجام شد. با توجه به نرمال و همگن بودن داده‌ها طبق آزمون‌های Shapiro-Wilk و Levene، برای بررسی تأثیر تیمارهای لجن فاضلاب بر متغیرهای مورد بررسی از آزمون تجزیه واریانس یک‌طرفه (ANOVA) و برای گروه‌بندی و مقایسه میانگین‌ها از آزمون توکی استفاده گردید.

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

۳-۱. تأثیر کاربرد لجن فاضلاب بر ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک

بررسی خاک عرصه کاشت درختان صنوبر تبریزی (عمق ۰ تا ۶۰ سانتی‌متر) پس از گذشت سه سال نشان داد که اصلاح خاک با لجن فاضلاب بر برخی ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک شامل بافت، اسیدیته و شوری و سطح برخی عناصر نظیر پتاسیم، آهن، منگنز و کادمیم تأثیر معنی‌دار آماری نداشته است. در مقابل، افزایش معنی‌دار درصد ماده آلی خاک و سطح برخی عناصر غذایی شامل نیتروژن، فسفر، سولفور، مس و روی در تیمارهای لجن فاضلاب با بیشترین مقادیر در تیمار ۲۰ کیلوگرم بر مترمربع لجن فاضلاب نسبت به تیمار شاهد مشاهده شد. از سوی دیگر، افزایش معنی‌دار غلظت برخی فلزات سنگین نظیر نیکل، کروم و سرب در خاک تیمار شده با ۲۰ کیلوگرم بر مترمربع لجن فاضلاب نسبت به تیمار شاهد مشاهده شد. اما بین تیمار ۱۰ کیلوگرم بر مترمربع لجن فاضلاب و تیمار شاهد، از نظر غلظت فلزات سنگین خاک، تفاوت معنی‌دار آماری مشاهده نشد (جدول ۲). نتایج پژوهش‌های انجام‌شده نشان داده است که اصلاح خاک با لجن فاضلاب بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک تأثیرگذار است [۱۷، ۱۸، ۱۹]. در واقع، تحت تأثیر کوددهی خاک با لجن فاضلاب، ویژگی‌هایی از خاک نظیر تخلخل، تهویه، چگالی ظاهری، پایداری سنگدانه، ظرفیت نگهداشت آب، میزان ماده آلی و همچنین سطح عناصر غذایی موجود در خاک می‌تواند بهبود پیدا کند [۲۰، ۲۱]. البته باید این نکته را مدنظر قرار داد که با توجه به تغییر ویژگی‌های لجن فاضلاب تحت تأثیر منبع تولید و همچنین تغییرات فصلی آن، تأثیر کوددهی با انواع مختلف لجن فاضلاب بر ویژگی‌های خاک متغیر بوده و تغییرات ایجاد شده در خاک به عوامل دیگری نظیر ویژگی‌های خاک، میزان کاربرد لجن، اثرات متقابل خاک و لجن و همچنین pH خاک وابسته است [۲۲]. از سوی دیگر، اصلاح خاک با لجن فاضلاب به‌ویژه زمانی که غلظت‌های بالایی از فلزات و ترکیبات سمی در لجن فاضلاب وجود داشته باشد، می‌تواند منجر به افزایش سطح فلزات سنگین و سمی در خاک شود [۱۹]. نتایج این مطالعه نشان داد که کوددهی خاک با ۲۰ کیلوگرم بر مترمربع لجن فاضلاب منجر به افزایش معنی‌دار غلظت برخی فلزات سنگین در خاک شد (جدول ۲). در مطالعه Nissim و همکاران (۲۰۱۸) نیز افزایش سطح برخی فلزات سنگین در خاک در نتیجه کوددهی با لجن فاضلاب بیان شده است [۲۳]. در مقابل، برخی مطالعات انجام‌شده، عدم تأثیر کوددهی خاک با لجن فاضلاب بر غلظت کل و قابل دسترس فلزات سنگین در خاک را گزارش کردند [۲۴]. نتایج متفاوت در این زمینه ناشی از تفاوت در غلظت عناصر فلزی موجود در لجن فاضلاب متأثر از فاکتورهایی شامل منبع فاضلاب تولیدی و فرآیندهای تصفیه فاضلاب و لجن است [۲۵، ۲۶]. از سوی دیگر، زیست‌فراهمی عناصر فلزی لجن در خاک نیز تحت تأثیر pH و میزان ماده آلی خاک و همچنین میزان کاربرد لجن متغیر خواهد بود [۲۷].

۳-۲. عملکرد رویشی درختان صنوبر تبریزی تحت تأثیر اصلاح خاک با لجن فاضلاب

بررسی متغیرهای رویشی درختان صنوبر تبریزی در پایان فصل رویش اول نشان داد که در اولین فصل رویش، تیمار خاک با لجن فاضلاب تأثیری بر متغیرهای قطر برابر سینه، ارتفاع و حجم در هکتار درختان نداشته است (جدول ۳). نتایج سال دوم و سوم نیز

نشان داد که در این دو فصل رویش، قطر برابر سینه و میانگین حجم در هکتار درختان صنوبر تبریزی تحت تأثیر اصلاح خاک با لجن فاضلاب به‌طور معنی‌داری بیشتر از تیمار شاهد بود و بیشترین مقادیر در تیمار ۲۰ کیلوگرم بر مترمربع لجن فاضلاب مشاهده شد، اما بین دو تیمار لجن فاضلاب تفاوت معنی‌دار آماری مشاهده نشد (جدول ۳). در مقابل، در این دو فصل رویش، اگرچه ارتفاع درختان صنوبر در تیمارهای لجن فاضلاب بیشتر از تیمار شاهد بود، ولی کوددهی با لجن فاضلاب تأثیر معنی‌دار آماری بر ارتفاع درختان نداشته است (جدول ۳). عدم تأثیر و یا حتی کاهش عملکرد رویشی درختان صنوبر و بید در سال‌های اولیه استقرار، تحت تأثیر کاربرد لجن فاضلاب در مطالعه Kubátová و همکاران (۲۰۱۶) نیز گزارش شده است [۲۸]. یکی از دلایل این امر هجوم علف‌های هرز در سال‌های اولیه استقرار نهال‌ها عنوان شده است که عملکرد گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۲۹، ۳۰]. درواقع، با ورود بالای عناصر غذایی در نتیجه کاربرد پسماندهای آلی، احتمال بروز و هجوم علف‌های هرز وجود دارد [۳۱]. همچنین، معمولاً در سال‌های اولیه، خاک حاصلخیزی بیشتری دارد، ولی با استفاده عناصر غذایی توسط گیاهان و بازگشت کم مواد غذایی به خاک، طی چند سال، کاهش حاصلخیزی خاک رخ می‌دهد [۳۲]. بنابراین عدم تفاوت و یا تفاوت کم بین تیمارهای کودی و شاهد در سال‌های اولیه استقرار درختان دور از انتظار نیست. مطابق با نتایج این پژوهش مبنی بر تأثیر مثبت کوددهی با لجن فاضلاب بر عملکرد رویشی درختان صنوبر تبریزی در سال‌های دوم و سوم، عملکرد تولید بالاتر برخی درختان تندرشد در نتیجه کاربرد لجن فاضلاب در مطالعات دیگر شامل Sevel و همکاران (۲۰۱۴) [۳۳] بر روی درختان بید (*S. viminalis* × *Salix schwerinii*)، Tsakou و همکاران (۲۰۰۳) [۳۴] بر روی درختان صنوبر (*Populus euramericana*)، Silva و همکاران (۲۰۱۱) [۳۵] و Ferraz و همکاران (۲۰۱۶) [۳۶] و Soudani و همکاران (۲۰۱۷) [۲] بر روی درختان اکالیپتوس (*Eucalyptus grandis* و *E. camaldulensis*) نیز گزارش شده است. اصلاح خاک با لجن فاضلاب با تأثیرات مثبت بر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک، افزایش رشد و عملکرد گیاه را منجر می‌شود [۱]. درواقع، افزایش عملکرد رویشی گیاه در نتیجه کاربرد لجن فاضلاب ناشی از افزایش غلظت عناصر غذایی ضروری نظیر نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم و غیره، افزایش ریزمغذی‌هایی که به آهستگی در خاک رها می‌شوند و همچنین بهبود قابلیت جذب بسیاری از عناصر غذایی اتفاق می‌افتد [۲، ۱۷].

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

تیمارهای لجن فاضلاب	یافت	pH	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)	کربن آلی (درصد)	نیتروژن (درصد)	فسفر (گرم بر کیلوگرم)	پتاسیم (گرم بر کیلوگرم)	سولفور (میلی گرم بر کیلوگرم)
شاهد	لومی رسی	۸/۲±۰/۳۷۳ ^a	۰/۹۸±۰/۰۷۷ ^a	۰/۷۴±۰/۰۸۰ ^c	۰/۰۶±۰/۰۰۵ ^c	۰/۸۷۶±۰/۰۷۴ ^c	۲۰/۱۵±۱/۱۴ ^a	۲۲۰/۱۲±۹/۴۵ ^b
۱۰ کیلوگرم بر مترمربع	لومی رسی	۷/۸±۰/۲۸۰ ^a	۱/۲±۰/۰۸۸ ^a	۱/۴۸±۰/۱۳۲ ^b	۰/۱۷±۰/۰۰۹ ^b	۱/۲۴±۰/۰۹۷ ^b	۲۰/۱۲±۱/۲۵ ^a	۴۱۰/۱۱±۱۳/۰۵ ^a
۲۰ کیلوگرم بر مترمربع	لومی رسی	۷/۷±۰/۳۵۴ ^a	۱/۱±۰/۱۱۲ ^a	۳/۱۴±۰/۳۲۱ ^a	۰/۳۷±۰/۰۱۱ ^a	۱/۸۵±۰/۰۸۸ ^a	۱۹/۷۷±۱/۳۳ ^a	۴۸۰/۳۳±۲۵/۹۷ ^a
معنی‌داری	-	۰/۴۰۵ ^{ns}	۰/۴۵۶ ^{ns}	۰/۰۰۰ ^{**}	۰/۰۰۰ ^{**}	۰/۰۰۰ ^{**}	۰/۰۸۸ ^{ns}	۰/۰۰۰ ^{**}
تیمارهای لجن فاضلاب	آهن (گرم بر کیلوگرم)	مس (میلی گرم بر کیلوگرم)	روی (میلی گرم بر کیلوگرم)	منگنز (میلی گرم بر کیلوگرم)	نیکل (میلی گرم بر کیلوگرم)	کروم (میلی گرم بر کیلوگرم)	سرب (میلی گرم بر کیلوگرم)	کادمیم (میلی گرم بر کیلوگرم)
شاهد	۳۱/۴۵±۱/۲۳ ^a	۴۰/۳۳±۱/۳۳ ^b	۹۸/۶۷±۲/۱۸ ^b	۹۰/۲۳±۱۴/۱۹ ^a	۳۹/۰۱±۱/۵۴ ^b	۳۶/۳۷±۱/۳۱ ^b	۲۵/۱۱±۱/۴۲ ^b	۰/۲۸۰±۰/۰۰۹ ^a
۱۰ کیلوگرم بر مترمربع	۳۰/۹۷±۱/۳۰ ^a	۴۴/۰۱±۲/۸۸ ^{ab}	۱۲۸/۶۷±۶/۱۱ ^a	۸۸/۳۳±۱۱/۰۵ ^a	۳۸/۸۹±۱/۲۳ ^b	۳۶/۵۰±۱/۸۱ ^b	۲۶/۱۸±۱/۴۰ ^{ab}	۰/۲۶۳±۰/۰۰۷ ^a
۲۰ کیلوگرم بر مترمربع	۳۰/۶۱±۱/۳۹ ^a	۵۰/۳۳±۲/۶۸ ^a	۱۴۸/۳۳±۸/۹۶ ^a	۸۸۵/۰۱±۱۵/۱۱ ^a	۴۰/۹۴±۱/۳۶ ^a	۳۸/۸۴±۱/۶۳ ^a	۲۸/۲۷±۱/۴۹ ^a	۰/۲۷۰±۰/۰۰۸ ^a
معنی‌داری	۰/۰۸۰ ^{ns}	۰/۰۴۷ [*]	۰/۰۰۴ ^{**}	۰/۵۲۸ ^{ns}	۰/۰۱۸ [*]	۰/۰۳۷ [*]	۰/۰۱۰ [*]	۰/۴۲۳ ^{ns}

**معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۹ درصد؛ *معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵ درصد؛ ^{ns}عدم تفاوت معنی‌دار آماری؛ حروف انگلیسی متفاوت تفاوت معنی‌دار آماری بین تیمارها را نشان می‌دهد.

جدول ۳. تأثیر کاربرد لجن فاضلاب بر عملکرد رویشی درختان صنوبر تبریزی (میانگین $\pm$ اشتباه معیار)

تیمارهای لجن فاضلاب	متغیرهای رویشی فصل رویش اول			متغیرهای رویشی فصل رویش دوم			متغیرهای رویشی فصل رویش سوم		
	قطر برابر سینه (سانتی متر)	ارتفاع (متر)	حجم (مترمکعب در هکتار)	قطر برابر سینه (سانتی متر)	ارتفاع (متر)	حجم (مترمکعب در هکتار)	قطر برابر سینه (سانتی متر)	ارتفاع (متر)	حجم (مترمکعب در هکتار)
شاهد	۲/۰۴ $\pm$ ۰/۱۳۴ ^a	۳/۰۱ $\pm$ ۰/۲۲۸ ^a	۱/۵۴ $\pm$ ۰/۲۳۱ ^a	۵/۰۱ $\pm$ ۰/۱۶۷ ^b	۴/۹۳ $\pm$ ۰/۱۷۷ ^a	۱۳/۰۲ $\pm$ ۰/۹۸۱ ^b	۷/۷۴ $\pm$ ۰/۲۸۳ ^b	۶/۸۲ $\pm$ ۰/۲۸۷ ^a	۴۲/۹۰ $\pm$ ۳/۹۴ ^b
۱۰ کیلوگرم بر مترمربع	۲/۱۶ $\pm$ ۰/۱۲۴ ^a	۳/۰۲ $\pm$ ۰/۲۱۸ ^a	۱/۵۷ $\pm$ ۰/۱۸۰ ^a	۵/۸۷ $\pm$ ۰/۱۷۵ ^a	۵/۰۷ $\pm$ ۰/۱۸۰ ^a	۱۸/۰۸ $\pm$ ۱/۲۱ ^a	۸/۸۱ $\pm$ ۰/۲۹۸ ^a	۷/۳۳ $\pm$ ۰/۲۲۸ ^a	۶۰/۳۳ $\pm$ ۵/۴۴ ^a
۲۰ کیلوگرم بر مترمربع	۲/۱۷ $\pm$ ۰/۱۳۱ ^a	۳/۰۹ $\pm$ ۰/۲۵۷ ^a	۱/۷۵ $\pm$ ۰/۲۲۵ ^a	۵/۷۵ $\pm$ ۰/۱۶۹ ^a	۵/۱۵ $\pm$ ۰/۱۷۹ ^a	۱۷/۴۸ $\pm$ ۱/۱۷ ^a	۸/۸۲ $\pm$ ۰/۲۹۹ ^a	۷/۱۴ $\pm$ ۰/۲۶۵ ^a	۵۹/۰۴ $\pm$ ۵/۰۵ ^a
معنی داری	۰/۷۱۳ ^{ns}	۰/۸۱۷ ^{ns}	۰/۷۷۴ ^{ns}	۰/۰۰۱ ^{**}	۰/۲۱۳ ^{ns}	۰/۰۰۳ ^{**}	۰/۰۱۵ [*]	۰/۱۸۳ ^{ns}	۰/۰۲۷ [*]

^{**}معنی داری در سطح اطمینان ۹۹ درصد؛ ^{*}معنی داری در سطح اطمینان ۹۵ درصد؛ ^{ns}عدم تفاوت معنی دار آماری؛ حروف انگلیسی متفاوت تفاوت معنی دار آماری بین تیمارها را نشان می دهد.

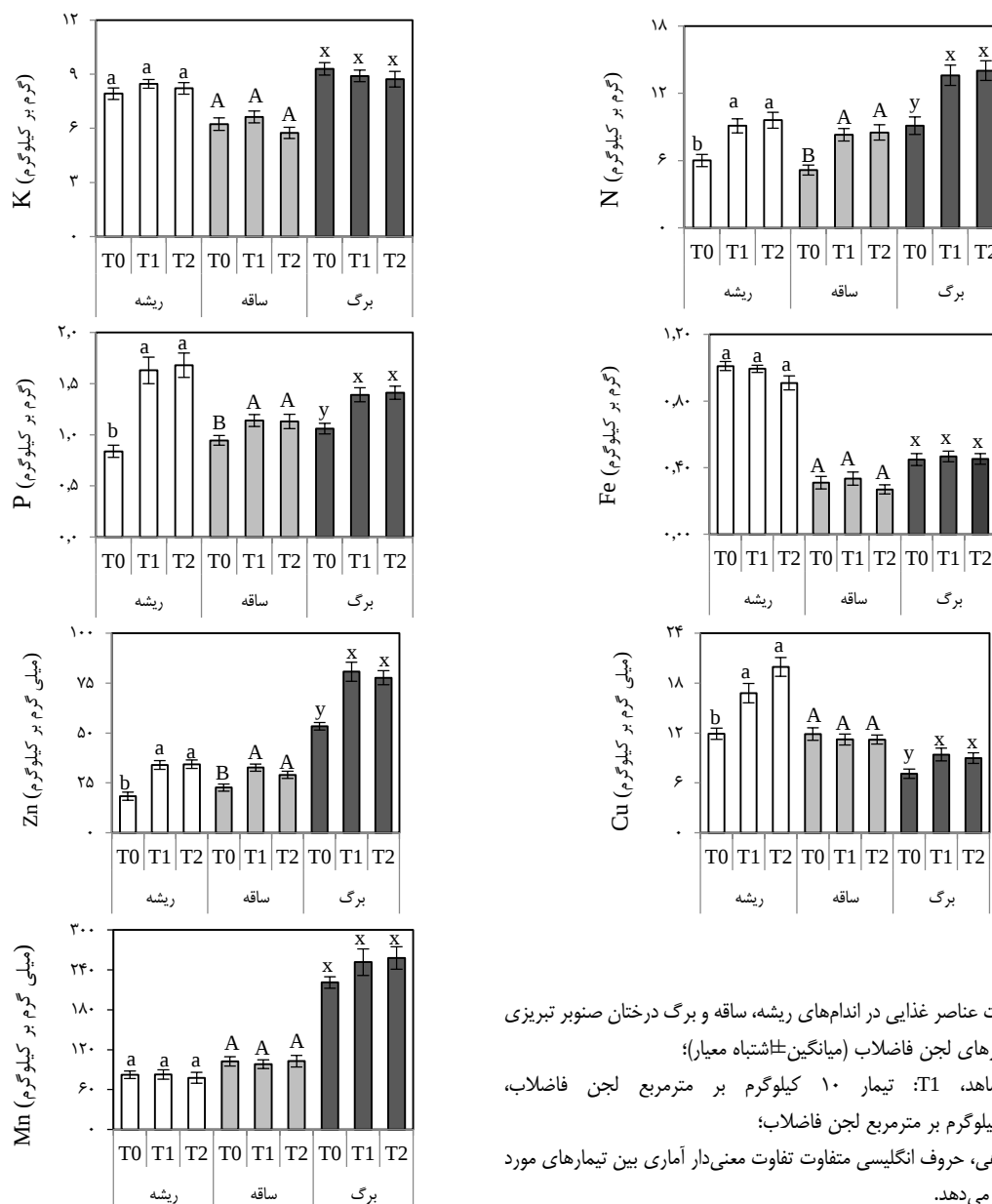
۳-۳. غلظت عناصر غذایی اندام های گیاهی تحت تأثیر اصلاح خاک با لجن فاضلاب

اصلاح خاک با لجن فاضلاب افزایش معنی دار غلظت عناصر غذایی اصلی نیتروژن و فسفر در اندام های ریشه، ساقه و برگ درختان صنوبر تبریزی را به همراه داشت. در مقابل، تأثیر معنی دار آماری بر غلظت پتاسیم اندام های گیاهی مشاهده نشد (جدول ۴). همچنین، غلظت عناصر غذایی کمیاب شامل روی در اندام های ریشه، ساقه و برگ و مس در اندام های ریشه و برگ به طور معنی داری در تیمارهای لجن فاضلاب بیشتر از تیمار شاهد بود (جدول ۴ و شکل ۱). اما در مورد غلظت عناصر آهن و منگنز اندام های گیاهی تفاوت معنی دار آماری بین تیمارهای مورد بررسی مشاهده نشد. شایان ذکر است که غلظت عناصر غذایی مورد بررسی بین دو تیمار لجن فاضلاب تفاوت معنی دار آماری نشان نداد (جدول ۴ و شکل ۱). نتایج پژوهش های پیشین نیز نشان داده است که اصلاح خاک با لجن فاضلاب می تواند بر رشد، تولید زی توده، فنولوژی، فتوسنتز، غلظت عناصر غذایی اصلی، ریز مغذی ها و فلزات سنگین جذب شده توسط گیاه مؤثر باشد [۲، ۳۷، ۳۸]. مطابق با نتایج این مطالعه، افزایش غلظت برخی عناصر غذایی در درختان صنوبر، بید و اکالیپتوس رشد یافته بر روی خاک اصلاح شده با لجن فاضلاب گزارش شده است [۲، ۳۹].

جدول ۴. تجزیه واریانس غلظت عناصر غذایی اندام های گیاهی تحت تأثیر تیمارهای لجن فاضلاب

عناصر غذایی	اندام گیاهی					
	ریشه		ساقه		برگ	
	درجه آزادی	میانگین مربعات	آماره F	درجه آزادی	میانگین مربعات	آماره F
نیتروژن (N)	۲	۱۱/۴۸	۶۰/۴۰ ^{**}	۲	۱۰/۳۱	۳۰/۱۳ ^{**}
فسفر (P)	۲	۰/۶۷۸	۱۵/۹۶ ^{**}	۲	۰/۰۳۷	۵/۹۸ [*]
پتاسیم (K)	۲	۰/۲۲۱	۲/۵۶ ^{ns}	۲	۰/۵۷۵	۱/۷۵ ^{ns}
آهن (Fe)	۲	۰/۰۱۰	۳/۵۶ ^{ns}	۲	۰/۰۰۳	۰/۸۳۷ ^{ns}
روی (Zn)	۲	۲۵۰/۷۷	۵۹/۳۹ ^{**}	۲	۷۶/۷۷	۱۰/۱۶ [*]
مس (Cu)	۲	۴۹/۳۵	۱۶/۰۷ ^{**}	۲	۰/۴۲۰	۰/۴۷۷ ^{ns}
منگنز (Mn)	۲	۲۳/۴۴	۴/۱۳ ^{ns}	۲	۱۷/۴۴	۰/۴۹۴ ^{ns}

^{**}معنی داری در سطح اطمینان ۹۹ درصد؛ ^{*}معنی داری در سطح اطمینان ۹۵ درصد؛ ^{ns}عدم تفاوت معنی دار آماری



شکل ۱. غلظت عناصر غذایی در اندام‌های ریشه، ساقه و برگ درختان صنوبر تبریزی تحت تأثیر تیمارهای لجن فاضلاب (میانگین ± اشتباه معیار): T0: تیمار شاهد، T1: تیمار ۱۰ کیلوگرم بر مترمربع لجن فاضلاب، T2: تیمار ۲۰ کیلوگرم بر مترمربع لجن فاضلاب؛ در هر اندام گیاهی، حروف انگلیسی متفاوت تفاوت معنی‌دار آماری بین تیمارهای مورد بررسی را نشان می‌دهد.

۳-۴. غلظت فلزات سنگین اندام‌های گیاهی تحت تأثیر اصلاح خاک با لجن فاضلاب

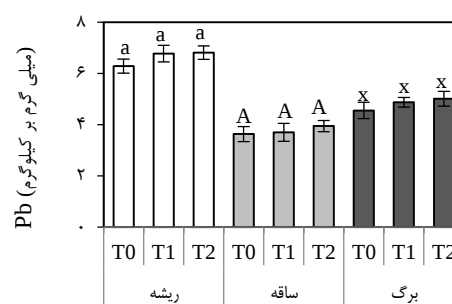
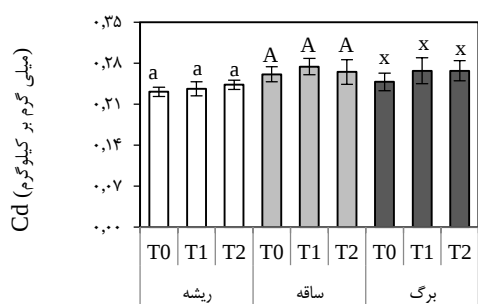
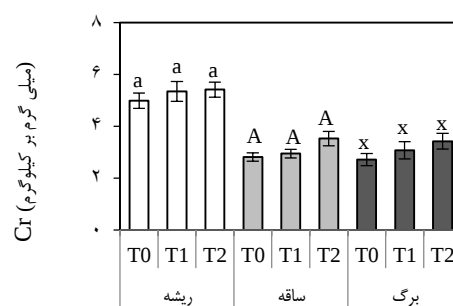
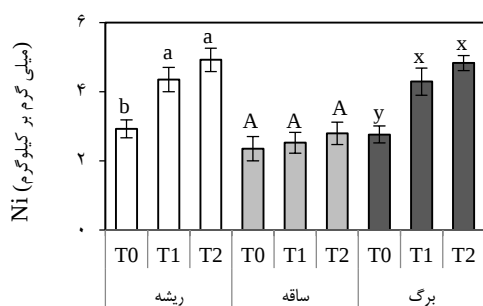
اصلاح خاک با لجن فاضلاب منجر به افزایش معنی‌دار غلظت فلز نیکل در اندام‌های ریشه و برگ درختان صنوبر تبریزی نسبت به تیمار شاهد شد. اما غلظت سایر فلزات سنگین مورد بررسی شامل کروم، کادمیم و سرب در اندام‌های گیاهی بین تیمارهای مورد مطالعه تفاوت معنی‌دار آماری نشان نداد (جدول ۵، شکل ۲). مطابق با نتایج حاضر، Kubátová و همکاران (۲۰۱۶) گزارش کردند که افزایش مقدار فلزات سنگین و سمی در پسماندهای آلی چون لجن فاضلاب لزوماً منجر به افزایش مقدار این فلزات در گیاهان نمی‌شود [۲۸]. حتی نتایج این محققان نشان داد که میزان فلزات سنگین جذب‌شده در اندام هوایی کلن‌های صنوبر و بید مورد مطالعه در تیمار شاهد بیشتر از تیمار لجن فاضلاب بود. درواقع، کاربرد کودهای آلی می‌تواند تحرک و دسترس‌پذیری فلزات برای گیاهان را محدود کند [۴۰]. در همین راستا، Garrido و همکاران (۲۰۱۲) در بررسی خود عنوان کردند که لجن فاضلاب منبع خوبی از مواد آلی است که موقعیت‌های جدیدی را برای جذب فلزات ایجاد می‌کند [۴۱]. Tsadilas و Shaheen (۲۰۱۰) نیز نشان دادند که استفاده از لجن فاضلاب به‌طور معنی‌داری میزان جذب فلزات سنگینی چون کادمیم و سرب را در مقایسه با تیمار شاهد

تغییر نداد [۴۲]. همچنین اصلاح خاک با لجن فاضلاب تأثیری بر غلظت فلزات سنگین و عناصر غذایی جذب شده در بافت چوبی درختان صنوبر (*P. euramericana*) نداشت [۳۴]. به نظر می‌رسد که توانایی جذب فلزات به‌طور عمده توسط pH خاک تحت تأثیر قرار می‌گیرد [۲۸] و الگوی تجمع عناصر و فلزات براساس نوع خاک، گونه گیاهی، فنولوژی و اثرات متقابل عناصر و فلزات می‌تواند متغیر باشد [۴۳، ۱۷].

جدول ۵. تجزیه واریانس غلظت فلزات سنگین اندام‌های گیاهی تحت تأثیر تیمارهای لجن فاضلاب

فلزات سنگین	اندام گیاهی					
	ریشه		ساقه		برگ	
	درجه آزادی	میانگین مربعات	آماره F	درجه آزادی	میانگین مربعات	آماره F
نیکل (Ni)	۲	۳/۹۱	۵/۳۰*	۲	۰/۱۵۲	۰/۲۹۵ ^{ns}
کروم (Cr)	۲	۰/۱۶۰	۰/۵۰۵ ^{ns}	۲	۰/۴۳۵	۳/۱۲ ^{ns}
کادمیم (Cd)	۲	۰/۰۰۰	۰/۹۳۴ ^{ns}	۲	۰/۰۰۰	۰/۶۸۶ ^{ns}
سرب (Pb)	۲	۰/۲۵۱	۲/۱۳ ^{ns}	۲	۰/۰۸۱	۰/۴۷۰ ^{ns}

* معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵ درصد؛ ns عدم تفاوت معنی‌دار آماری



شکل ۲. غلظت فلزات سنگین در اندام‌های ریشه، ساقه و برگ درختان صنوبر تبریزی تحت تأثیر تیمارهای لجن فاضلاب (میانگین ± اشتباه معیار): T0: تیمار شاهد، T1: تیمار ۱۰ کیلوگرم بر مترمربع لجن فاضلاب، T2: تیمار ۲۰ کیلوگرم بر مترمربع لجن فاضلاب؛ در هر اندام گیاهی، حروف انگلیسی متفاوت تفاوت معنی‌دار آماری بین تیمارهای مورد بررسی را نشان می‌دهد.

۴. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج پژوهش انجام شده افزایش عملکرد تولید در هکتار درختان صنوبر تبریزی را پس از گذشت سه سال در نتیجه اصلاح خاک با لجن فاضلاب تولیدی در تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران نشان داد، ولی درختان صنوبر تحت دو تیمار مورد بررسی لجن فاضلاب (۱۰ و ۲۰ کیلوگرم بر مترمربع)، تفاوت معنی‌دار آماری از این نظر نشان ندادند. از سوی دیگر، اصلاح خاک با ۲۰ کیلوگرم بر مترمربع لجن فاضلاب، افزایش سطح برخی فلزات سنگین در خاک را نسبت به تیمار شاهد نشان داد. با توجه به نتایج به‌دست

آمده می‌توان توصیه کرد که برای مناطقی با شرایطی مشابه با شرایط این مطالعه از نظر خاک و اقلیم، کوددهی با تیمار ۱۰ کیلوگرم بر مترمربع لجن فاضلاب برای افزایش عملکرد تولید در هکتار درختان صنوبر تبریزی، می‌تواند بدون داشتن نگرانی‌های محیط زیستی انجام شود. اما، با توجه به دوره بهره‌برداری حداقل ۶ تا ۸ ساله برای صنوبرکاری‌ها، برای ارائه نتایجی با اعتبار بیشتر، نیاز است تأثیر کوددهی با این پسماند آلی، حداقل تا پایان سال ششم مورد بررسی قرار گیرد.

سیاسگزاری

نویسندگان مقاله مراتب تشکر و قدردانی خود را از مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور و شرکت فاضلاب استان تهران بابت حمایت مالی از پژوهش انجام‌شده، اعلام می‌دارند.

۵. منابع

- [1] 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.
- [2] Soudani, L., Mhamed, M., Hermann, H., Mykola, K., Oliver, W., Christin, M., Elena, O. & Nadiaa, B. (2017). Fertilization value of municipal sewage sludge for *Eucalyptus camaldulensis* plants. *Biotechnology Reports*, 13, 8-12.
- [3] 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.
- [4] Baran, A., Cayci, G., Kutak, C. & Hartmann R. (2001). Composted grape marc as growing medium for hypostases (*Hypostases phyllostagya*). *Bioresource Technology*, 78(1), 103-106.
- [5] 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.
- [6] Salehi, A. & Ahmadloo, F. (2022). Growth properties and nutrients and heavy metals uptake of two-year old seedlings of three black poplar clones in soil with wastewater irrigation. *Forest and Wood Products*, 74(4), 445-456. (In Persian)
- [7] Pulford, I.D. & Dickinson, N.M. (2005). Phytoremediation technologies using trees. In: Prasad MNV, Naidu R [eds.], *Trace Elements in the Environment*, 375-395. CRC Press, New York.
- [8] 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(1), 155-165.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Zobeiri, M. (2005). *Forest Inventory (Measurement of Tree and Forest)*, Tehran University Press, Tehran, Iran, 2005, p. 401.
- [12] 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., Johnston, C.T., 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, 1390 p.

- [13] Bouyoucos, G.J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agronomy Journal*, 54(5), 464-465.
- [14] 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, 1159 p.
- [15] 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, 1159 p.
- [16] Nelson, D.W. & Sommers, L.E. (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter: pp. 961-1010. In: Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., Loeppert, R.H., Soltanpour, P.N., Tabatabai, M.A., Johnston, C.T. & 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, 1390 p.
- [17] Singh, R.P., & Agrawal, M. (2008). Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. *Waste Management*, 28(2), 347-358.
- [18] Dahiya, P., Singh, N. & Singh, A. (2022). Impact of sewage sludge application on microbial diversity and fertility of soil: A long-term study. In M.P. Shah, N. Shah, S. Rodriguez-Couto & R. Banerjee (Eds.), *Development in Waste Water Treatment Research and Processes*, pp. 91-106.
- [19] 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*, pp. 197-214.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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(4), 573-597.
- [23] 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.
- [24] 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(5), 1522-1527.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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 and Soil*, 262, 71-84.
- [28] Kubátová, P., Hejman, 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.
- [29] 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.
- [30] Larsen, S.U., Jørgensen, U., & Lærke, P.U. (2014). Willow yield is highly dependent on clone and site. *BioEnergy Research*, 7, 1280-1292.
- [31] 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.

- [32] Karlton, 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.
- [33] Sevel, L., Nord-Larsen, T., Ingerslev, M., Jørgensen, U. & Raulund-Rasmussen, K. (2014). Fertilization of SRC willow, I: Biomass production response. *BioEnergy Research*, 7, 319-328.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] Pascual, I., Avilés, M., Aguirreolea, J. *et al.* (2008). Effect of sanitized and non-sanitized sewage sludge on soil microbial community and the physiology of pepper plants. *Plant and Soil*, 310, 41-53.
- [38] 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.
- [39] 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, 109360.
- [40] Chaney, R.L., Li, Y.M., Angle, J.S., Baker, A.J.M., Reeves, R.D., Brown, S.L., Homer, F.A., Malik, M. & Chin, M. (1999). Improving metal hyperaccumulator wild plants to develop commercial phytoextraction systems: approaches and progress. In: Terry N, Bañuelos GS (eds) *Phytoremediation of contaminated soil and water*. CRC Press, Boca Rat, p 408.
- [41] Garrido, T., Mendoza, J. & Arriagada, F. (2012). Changes in the sorption, desorption, distribution and availability of copper, induced by application of sewage sludge on Chilean soils contaminated by mine tailings. *Journal of Environmental Sciences*, 24(5), 912-918.
- [42] Shaheen, S.M. & Tsadilas, C.D. (2010). Influence of fly ash and sewage sludge application on cadmium and lead sorption by an acidic Alfisol. *Pedosphere*, 20(4), 436-445.
- [43] 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(3), 359-364.