The Effect of Sewage Sludge Application on some Vegetative Characteristics of Maize (*Zea mays* L.) in Soils with Different Textures

Maryam Shakoori[1], Akbar Hassani[2*], Mohammad Babaakbari Sari[3], Mehdi Tafvizi[4], Ehsan Khoshkalam[5]

(Received: May, 2025 Accepted: September, 2025)

Abstract

Given the accelerating pace of population growth and the corresponding increase in demand for food resources, the use of alternative fertilizers such as sewage sludge has emerged as a sustainable strategy in agricultural systems. This study was conducted in a greenhouse using a completely randomized design to assess the effects of varying amounts of sewage sludge on maize (*Zea mays* L.) growth in two soil types: clay loam and sandy loam. The experimental treatments included five sludge application rates: 0.125%, 0.25%, 0.5%, 1%, and 10% (w/w). Several plant growth parameters were measured and analyzed, including germination percentage, plant height, growth rate, fresh and dry biomass of shoots and roots, chlorophyll and carotenoid concentrations, total leaf soluble solids, antioxidant activity, and concentrations of phosphorus, nitrogen, and potassium in plant tissues. The results showed that low to moderate applications of sewage sludge (0.125% to 1%) significantly improved growth indices. Compared to the control treatment, adding 1% sludge to clay loam soil and 0.5% to sandy loam soil produced the greatest positive effect on increasing concentrations of chlorophyll a, chlorophyll b, total chlorophyll, carotenoids, antioxidant activity, and the fresh weight of shoots and roots. In contrast, the treatment with 10% sludge negatively affected plant growth and physiological characteristics, resulting in reduced growth. Additionally, as sludge content in the soil increased, concentrations of phosphorus, nitrogen, and potassium in shoots and roots also rose significantly. Overall, the findings indicate that judicious and optimized use of sewage sludge can substantially enhance soil fertility by improving plant growth parameters and supplying essential nutrients. However, excessive application may cause detrimental effects; therefore, determining the optimal application rate and continuously monitoring the chemical composition of the sludge before its use in agricultural fields are imperative.

Keywords: chlorophyll, maize, plant nutrition, sewage sludge, soil amendment

Shakoori M., Hassani A., Babaakbari Sari M., Tafvizi M. and Khoshkalam E. 2025. The effect of sewage sludge application on some vegetative characteristics of maize (*Zea mays* L.) in soils with different textures. *Applied Soil Research*, 13(4): 105-123.

1. Ph.D. student, Department of soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.
2 & 3. Associate Professor, Department of soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.
4. Ph.D. Graduate, Department of soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.
5. Ph.D. Graduate, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad (FUM), Mashhad, Iran.
* Corresponding Author Email: akbar.hassani@znu.ac.ir

تأثیر کاربرد لجن فاضلاب بر برخی ویژگی‌های رویشی گیاه ذرت (*Zea mays* L.) در دو نوع خاک با بافت مختلف

مریم شکوری[۱]، اکبر حسنی[۲*]، محمد بابااکبری ساری[۳]، مهدی تفویضی[۴]، احسان خوش‌کلام[۵]

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۳)

چکیده

با توجه به روند فزاینده رشد جمعیت و افزایش تقاضا برای تأمین منابع غذایی، استفاده از کودهای جایگزین نظیر لجن فاضلاب به‌عنوان رویکردی پایدار در نظام‌های کشاورزی مطرح شده است. پژوهش حاضر در گلخانه و در قالب طرح کاملاً تصادفی با هدف ارزیابی اثر مقادیر متفاوت لجن فاضلاب بر رشد گیاه ذرت در دو نوع خاک لوم رسی و لوم شنی اجرا شد. تیمار آزمایش شامل مقادیر مختلف لجن شامل صفر، ۰/۱۲۵، ۰/۲۵، ۰/۵، ۱ و ۱۰ درصد وزنی-وزنی بود. برخی شاخص‌های رشد گیاه شامل درصد جوانه‌زنی، ارتفاع بوته، سرعت رشد، وزن تر و خشک بخش هوایی و ریشه، غلظت کلروفیل، کارتنوئید، مواد جامد محلول کل، فعالیت آنتی‌اکسیدانی و همچنین غلظت فسفر، نیتروژن و پتاسیم در گیاه مورد اندازه‌گیری و تحلیل قرار گرفتند. نتایج حاصل نشان داد که کاربرد لجن فاضلاب در مقادیر پایین تا متوسط (۰/۱۲۵ تا ۱ درصد) باعث بهبود معنی‌دار شاخص‌های رشد گردید. در مقایسه با تیمار شاهد، افزودن یک درصد لجن به خاک لوم رسی و نیم درصد به خاک لوم شنی، بیشترین اثر مثبت را بر افزایش غلظت کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل، کارتنوئید، فعالیت آنتی‌اکسیدانی و وزن تر بخش‌های هوایی و ریشه نشان داد. در مقابل، تیمار حاوی ۱۰ درصد لجن تأثیر منفی بر رشد و ویژگی‌های فیزیولوژیکی گیاه داشته و موجب کاهش رشد گردید. همچنین، با افزایش میزان لجن در خاک، غلظت فسفر، نیتروژن و پتاسیم در بخش‌های هوایی و ریشه به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. به‌طور کلی، نتایج مطالعه بیانگر آن است که استفاده مدیریت‌شده و بهینه از لجن فاضلاب می‌تواند با بهبود شاخص‌های رشد گیاه و تأمین عناصر غذایی ضروری، نقش مؤثری در ارتقای حاصلخیزی خاک ایفا کند. با این حال، کاربرد بیش از حد آن ممکن است پیامدهای منفی به‌دنبال داشته باشد. ازاین‌رو، تعیین مقدار بهینه و پایش مستمر ترکیب شیمیایی لجن پیش از استفاده در اراضی کشاورزی، امری ضروری تلقی می‌شود.

واژه های کلیدی: اصلاح خاک، تغذیه گیاه، ذرت، کلروفیل، لجن فاضلاب

شکوری م.، حسنی ا.، بابااکبری ساری م.، تفویضی م.، خوش‌کلام ا. ۱۴۰۴. تأثیر کاربرد لجن فاضلاب بر برخی ویژگی‌های رویشی گیاه ذرت (*Zea mays* L.) در دو نوع خاک با بافت مختلف. تحقیقات کاربردی خاک. جلد۱۳، شماره ۴. صفحه : ۱۲۳-۱۰۵.

۱- دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
۲و ۳- دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
۴- دانش‌آموخته دکتری گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
۵- دانش‌آموخته دکتری گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
* پست الکترونیک: akbar.hassani@znu.ac.ir

مقدمه

نیاز روزافزون برای تأمین غذای جمعیت رو به رشد جهان که تا سال ۲۰۳۰ به ۸/۵ میلیارد نفر خواهد رسید، کشاورزان را به استفاده بی‌رویه از کودهای شیمیایی سوق داده است (Desa, U. N. 2022). اما تخریب منابع آب، خاک و محیط‌زیست ناشی از این روند، کشاورزی را به سمت روش‌های ارگانیک هدایت نموده است (Avis *et al.*, 2008). با توجه به افزایش قیمت کودها و مواد خام، استفاده از منابع بومی برای کاهش وابستگی به واردات و تأمین امنیت غذایی ضروری است. بهره‌گیری از ضایعات آلی کشاورزی، شهری و صنعتی مصرف کودهای شیمیایی را کاهش داده و به کشاورزی پایدار کمک می‌کند. همچنین، مدیریت این پسماندها مخاطرات زیست‌محیطی را کم کرده و بهره‌وری زمین‌های کشاورزی را افزایش می‌دهد. محققان بیان کرده‌اند که کودهای آلی می‌توانند به‌عنوان مکمل کودهای شیمیایی، خاک و توده میکروبی آن را بهبود دهند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که پسماندهای آلی و کود دامی حاوی مقادیر زیادی عناصر غذایی پرمصرف و کم‌مصرف هستند و از طریق تشکیل کلات، فراهمی این عناصر را افزایش می‌دهند (Najafi *et al.*, 2013). با این حال، تأثیر کودهای آلی بر رشد و عملکرد گیاه به نوع مواد زائد، فرآیند تولید و درجه معدنی شدن آن‌ها بستگی دارد (Naeem *et al.*, 2006). لجن فاضلاب، یکی از مهم‌ترین پسماندهای آلی است که به‌عنوان کود قابل استفاده بوده (Delibacak *et al.*, 2020) و منبعی غنی از عناصر غذایی برای رشد گیاهان محسوب می‌شود (Kominko *et al.*, 2019; Najafi & Mardomi, 2013). لجن به‌طور معمول حاوی فسفر (Kominko *et al.*, 2024)، نیتروژن و سایر عناصر ضروری برای گیاهان است (Usman *et al.*, 2012; Vuaille *et al.*, 2022). کاربرد آن در کشاورزی به‌دلیل بهبود ویژگی‌های خاک، روشی مؤثر و مقرون‌به‌صرفه است و با افزایش مواد آلی و عناصر غذایی خاک، جایگزین مناسبی برای کودهای معدنی و دامی به‌شمار می‌رود (Delibacak *et al.*, 2020). از این‌رو، کشاورزان از آن به‌عنوان کودی ارزان در زمین‌های کشاورزی بهره می‌برند. استفاده از لجن فاضلاب در خاک، نقش مهمی در حاصلخیزی خاک دارند (Sharma *et al.*, 20201; Kominko *et al.*, 2024) و استفاده از آن ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک را بهبود می‌بخشد (Najafi & Abbasi, 2014). به‌عنوان مثال، کاربرد لجن فاضلاب می‌تواند موجب کاهش pH (Nielson *et al.*, 1998)، کاهش چگالی ظاهری خاک (Ojeda *et al.*, 2003)، افزایش مقدار هوموس (Kulling *et al.*, 2001)، افزایش ظرفیت تبادلی خاک، تخلخل و ظرفیت نگهداری آب (Ramulu, 2002) در خاک گردد. در نتیجه کاربرد لجن فاضلاب می‌تواند بر رشد گیاهان اثر مثبتی داشته باشد. چیمرین و چاکر (Çimrin & Çakır, 2020) گزارش دادند که کاربرد لجن فاضلاب (۰ تا ۱۰ درصد) وزن تر و خشک ریشه و اندام هوایی، ارتفاع و قطر بوته ذرت را نسبت به شاهد افزایش داد. کاربرد لجن فاضلاب، صرف‌نظر از محتویات میکروبی، به‌دلیل تأمین مواد مغذی ضروری، برای رشد گیاه مفید است (Rahmani, *et al.*, 2014). اولیویرا و همکاران (Oliveira *et al.*, 2023) نشان دادند که کاربرد لجن کمپوست‌شده به‌عنوان یک کود ارگانیک با افزایش ریزمغذی‌ها (به‌ویژه بور و روی) در خاک، برای رشد لوبیا مؤثر بود. فلاحتی و همکاران (Felahati *et al.*, 2024) گزارش دادند که لجن فاضلاب در شرایط خشکی، صفات رشدی چای ترش (وزن تر و خشک اندام هوایی، ارتفاع، قطر ساقه و وزن خشک ریشه) را بهبود داد. نیک‌قدمی و همکاران (Nikghadami *et al.*, 2020) نیز گزارش دادند که کاربرد لجن فاضلاب موجب کاهش pH و افزایش هدایت الکتریکی و کربن آلی خاک گردید. اما کاربرد مقادیر بالای آن گیاهان را دچار سمیت نمود. این در حالی است که در مقادیر پایین، هیچگونه سمیت یا آسیبی در گیاه مشاهده نشد. بنابراین، اثرات کاربرد لجن به ترکیب شیمیایی و نحوه مصرف آن بستگی دارد و با رعایت استانداردها، می‌تواند از زباله به منبعی ارزشمند تبدیل شود (Sugurbekova *et al.*, 2023). استفاده از کودهای آلی با وجود مزایا، معایبی نیز دارد. کاربرد مقادیر مناسب لجن فاضلاب شرایط فیزیکی خاک را بهبود داده و با تأمین عناصر غذایی برای گیاه، کمیت و کیفیت محصول را افزایش می‌دهد، اما مصرف بیش از حد آن مضر بوده و عملکرد و کیفیت محصولات را کاهش می‌دهد (Fresques *et al.*, 1990). محدودیت اصلی استفاده از لجن، پتانسیل آزادسازی فلزات سنگین و تجمع فلزات سنگین در خاک است که می‌تواند به سطوح سمی برسد (Singh & Agrawal, 2008; Afzalinejad, 2022). برخی پژوهشگران کاهش کیفیت و عملکرد محصولات در کاربرد

زیاد لجن فاضلاب را به وجود فلزات سنگین نسبت می‌دهند (Singh & Agrawal, 2007). بنابراین، تعیین مقادیر مناسب لجن به‌عنوان کود، ضروری است. زیرا بسیاری از این لجن‌ها حاوی مقادیر قابل توجهی از عناصر بالقوه سمی و عوامل بیماری‌زا هستند که می‌تواند منجر به تجمع زیستی در بافت‌های مختلف گیاهی و خاک شوند (Guoqing *et al*., 2019). همچنین، منشأ متفاوت لجن‌ها باعث تنوع در غلظت فلزات سنگین می‌شود و نیازمند بررسی و رعایت مقررات محلی است (Grgas *et al*., 2023). گیاه ذرت در اغلب مناطق ایران کشت می‌شود و کشاورزان با هدف تأمین برخی عناصر مورد نیاز گیاه در اراضی تحت کشت خود از لجن فاضلاب برای اصلاح خاک و همچنین به‌عنوان کود آلی استفاده می‌کنند. بر این اساس، بررسی تأثیر کاربرد لجن فاضلاب بر شاخص‌های رشد گیاه ذرت حائز اهمیت می‌باشد. در این پژوهش مقادیر مختلفی از لجن فاضلاب در خاک‌هایی با بافت لوم شنی و لوم رسی اضافه شد و اثرات آن بر برخی ویژگی‌های گیاه ذرت مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش دو نوع خاک با بافت‌های مختلف (لوم رسی و لوم شنی) از عمق صفر تا ۲۵ سانتی‌متری خاک جمع‌آوری شد. خاک لوم رسی از زمینی واقع در جاده فیروزآباد شهرستان ری در استان تهران (طول جغرافیایی: ۵۱/۴۷۳۴ درجه شرقی، عرض جغرافیایی: ۳۵/۵۵۳۷ درجه شمالی) و خاک لوم شنی از زمینی واقع در جاده شهریار شهر کرج در استان البرز (طول جغرافیایی: ۵۱/۰۲۸۵ درجه شرقی، عرض جغرافیایی: ۳۵/۷۳۴۹ درجه شمالی) جمع‌آوری شد. نمونه‌های خاک پس از هوا خشک شدن از الک دو میلی‌متر عبور داده شدند. برخی ویژگی‌های خاک شامل: بافت خاک با روش هیدرومتری (دوزمانه: ۴۰ ثانیه و ۲ ساعت) (Bouyoucos, 1962)، هدایت الکتریکی (Rhoades *et al*., 1989) و pH (Burt, 2004) در عصاره اشباع، کربن آلی روش والکی و بلک (Walkley & Black, 1934)، کربنات کلسیم معادل (Loeppert & Suarez, 1996)، پتاسیم قابل تبادل با روش استات آمونیوم ۱مولار (pH=۷) با نسبت ۱ به ۱۰ (خاک به عصاره‌گیر) (Thomas, 1983)، نیتروژن توسط روش کجلدال (Bremner, 1996)، فسفر قابل دسترس با روش اولسن (Olsen, 1954) و عناصر روی، آهن، مس و منگنز با روش DTPA (Lindsay & Norvell, 1978) در نمونه‌های خاک عصاره‌گیری شد. در ادامه، غلظت نیتروژن، فسفر و عناصر کم مصرف به ترتیب با استفاده از دستگاه‌های کجلدال مدل Hanon اتومات، اسپکتروفتومتر مدل Hanon-i3 و عناصر کم مصرف با دستگاه ICP مدل OES-720 Agilent اندازه‌گیری شد. نتایج به دست آمده در جدول ۱ نشان داده شده است. آزمایش در گلخانه و در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا شد. تیمار آزمایشی شامل شش سطح لجن فاضلاب شامل: صفر، ۰/۱۲۵، ۰/۲۵، ۰/۵، ۱ و ۱۰ درصد وزنی-وزنی بود. مقادیر مختلف لجن بر اساس پژوهش‌های (Zuo *et al*., 2019)، (Çakır and Çimrin, 2020) و (Kniuipytė *et al*., 2023) انتخاب شد. برای هر نوع خاک، تعداد واحدهای آزمایشی با در نظر گرفتن سه تکرار برای هر تیمار، برابر ۱۸ واحد بود. گلدان‌های پلاستیکی با ظرفیت سه کیلوگرم خاک به‌عنوان واحدهای آزمایشی در نظر گرفته شد. لجن‌فاضلاب تهیه شده از تصفیه‌خانه فاضلاب شهری شهر زنجان پس از خشک شدن پودر گردید. نتایج برخی ویژگی‌های لجن در جدول ۱ ارائه شده است. مقدار مورد نیاز برای هر تیمار به صورت وزنی-وزنی به خاک گلدان‌ها اضافه گردید. به‌منظور همگن شدن خاک گلدان‌ها پس از اضافه نمودن لجن فاضلاب، هشت مرتبه فرآیند تر و خشک شدن بر گلدان‌ها اعمال شد. سپس، در هر گلدان ۱۰ عدد بذر ذرت (رقم سینگل کراس ۷۰۴) کشت گردید. قبل از کشت، بذرها به مدت ۱۰ دقیقه در محلول سفید کننده (NaClO-bleach) و ۴۰ ثانیه در اتانول ۷۰ درصد استریل شدند و در انتها با استفاده از آب مقطر شستشو داده شدند (Leifheit *et al*., 2022). پس از جوانه‌زنی و در مرحله دو برگی گیاه، چهار بوته قوی در هر گلدان انتخاب و بقیه بوته‌ها حذف گردید. در مرحله جوانه‌زنی بذرها، درصد جوانه‌زنی بذر در هر یک از گلدان‌ها محاسبه گردید. همچنین، از مرحله جوانه‌زنی تا مرحله برداشت گیاهان، ارتفاع بوته‌ها در چهار زمان مختلف (۷، ۱۶، ۳۰ و ۴۵ روز) اندازه‌گیری شد و در روزهای ۱۶ام (تفاضل ارتفاع گیاه بین روز هفتم و ۱۶ام)، ۳۰ام (تفاضل ارتفاع گیاه بین روز ۱۶ و ۳۰ام) و ۴۵ام (تفاضل ارتفاع گیاه بین روز ۳۰ و ۴۵ام) میانگین سرعت رشد گیاه (Average Growth Rate) با استفاده از رابطه (۱) محاسبه گردید

(Hunt, 2012). در رابطه ارائه شده، t زمان و H ارتفاع گیاه است.

$$AGR = \frac{H_2 - H_1}{t_2 - t_1}$$ رابطه (۱)

پس از اتمام دوره کشت (۴۵ روز)، برخی ویژگی‌ها شامل مواد جامد محلول کل، فعالیت آنتی اکسیدانی و همچنین محتوی کلروفیل و کارتنوئید در برگ نمونه‌های گیاهی تازه مورد اندازه‌گیری قرار گرفت.

مواد جامد محلول، فعالیت آنتی اکسیدانی

غلظت مواد جامد محلول کل با استفاده از دستگاه رفراکتومتر (Paul *et al*., 2010) و فعالیت آنتی اکسیدانی با استفاده از رادیکال آزاد DPPH (2,2-Diphenyl- Picryl-Hydrazyl) اندازه‌گیری گردید (Akpinar-Bayizit *et al*., 2016). ابتدا محلول DPPH با انحلال ۷/۸۹ میلی‌گرم DPPH در ۲۰۰ سی سی متانول خالص تهیه شد. سپس ۲۰۰ میکرولیتر از عصاره گیاهی به فالکون منتقل کرده و ۳۸۰۰ میکرولیتر محلول DPPH اضافه شد. مخلوط به دست آمده به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در محیط آزمایشگاه و در شرایط تاریکی خوابانیده شد. سپس جذب در طول موج ۵۱۷ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت گردید. میزان جذب در نمونه شاهد تهیه شده با استفاده از همان مقدار متانول و محلول DPPH به‌عنوان کالیبراسیون دستگاه و کنترل منفی در نظر گرفته شد. در نهایت با استفاده از رابطه (۲) درصد فعالیت مهار رادیکال DPPH محاسبه گردید.

$$I\% = \left(\frac{A_0 - A_1}{A_0}\right) \times 100$$ رابطه (۲)

در این معادله A_1 و A_0 به‌ترتیب میزان جذب در نمونه و شاهد (حاوی همه اجزا واکنشگر بدون نمونه) را نشان می‌دهند.

محتوای کلروفیل و کاروتنوئید

غلظت کلروفیل و کاروتنوئید به‌روش آرنون (۱۹۶۷) اندازه‌گیری شد. به‌طور خلاصه، ۰/۱ گرم از بافت تازه گیاهی توزین و همراه با ۱۰ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد، داخل هاون چینی به‌طور کامل سابیده شدند. محلول‌های به دست آمده داخل فالکون به‌مدت ۳۰-۱۵ دقیقه و در تاریکی قرار داده شد. سپس، نمونه‌ها با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ در دور ۳۰۰۰ به مدت ۱۰ دقیقه تفکیک گردید. سپس، میزان جذب نور در طول موج های ۶۶۳ و ۶۴۵ نانومتر به‌ترتیب برای اندازه‌گیری محتوای کلروفیل a و b با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت گردید. برای اندازه‌گیری مقدار کارتنوئید نیز، جذب نور در طول موج‌های ۴۸۰ و ۵۱۰ نانومتر قرائت شد. در نهایت، غلظت کلروفیل و کارتنوئید با استفاده از روابط زیر محاسبه و گزارش گردید (رابطه‌های ۳، ۴ و ۵).

$$\text{Chlorophyll a} = (12.7 \times A663 - 2.69 \times A645) \times (V/W)$$ رابطه (۳)

$$\text{Chlorophyll b} = (22.9 \times A645 - 4.68 \times A663) \times (V/W)$$ رابطه (۴)

$$\text{Carotenoids} = (7.6 \times A480 - 1.49 \times A510) \times (V/W)$$ رابطه (۵)

در روابط ذکر شده، A645 و A663 به‌ترتیب مقدار جذب در طول موج‌های ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر، A480 و A510 به‌ترتیب مقدار جذب در طول موج‌های ۴۸۰ و ۵۱۰ نانومتر، V حجم نهایی نمونه به میلی‌لیتر و W وزن تر برگ به گرم است. ارتفاع بخش هوایی گیاه در مراحل مختلف رشد با استفاده از خط‌کش فلزی و از کف خاک تا انتهای بوته اندازه‌گیری شد. وزن تر بخش هوایی و ریشه گیاه پس از جدا کردن از خاک گلدان‌ها، با استفاده از ترازوی با دقت ۰/۰۱ گرم توزین شد. سپس نمونه‌های گیاهی در آون در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مـدت ۴۸ ساعت خشک شدند و پس از خشک شدن وزن خشک اندازه‌گیری شد.

اندازه‌گیری غلظت نیتروژن، فسفر و پتاسیم گیاه

برای اندازه‌گیری غلظت پتاسیم و فسفر در بخش‌های هوایی و ریشه گیاه، پس از آسیاب نمونه‌های خشک‌شده، هضم نمونه‌ها با روش مایکروویو انجام گرفت. سپس در عصاره‌های حاصل، غلظت فسفر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (مدلHanon-i3) و به‌روش زرد (مولیبدووانادات) (Chapman & Pratt, 1961)، و غلظت پتاسیم با دستگاه

فلیم‌فتومتر[1] (مدل 310C) تعیین شد. همچنین، غلظت نیتروژن کل در نمونه‌های آسیاب‌شده به روش کجلدال (Bremner, 1996) و با دستگاه کجلدال (مدل Hanon اتومات) اندازه‌گیری گردید.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

آنالیز و مقایسه میانگین داده‌ها به‌روش آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد با استفاده از نرم افزار SAS 9.4 انجام شد. ترسیم نمودارها توسط نرم افزار Excel انجام گردید.

نتایج و بحث

نتایج آنالیز خاک و لجن فاضلاب

نتایج برخی ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در نمونه‌های خاک و لجن در جدول ۱ ارائه گردیده است. نتایج نشان داد که میزان ماده آلی در هر دو نمونه خاک پایین بوده و مقادیر کربنات کلسیم معادل بالایی دارند. با توجه به مقادیر دانه‌بندی، بافت نمونه‌های خاک لوم شنی و لوم رسی است. بر اساس نتایج به دست آمده، pH لجن در محدوده تقریبا خنثی (۷/۲) بوده و مقدار شوری (۴/۳ دسی‌زیمنس بر متر در عصاره ۱ به ۱۰ لجن به آب) و کربن آلی (۳۶/۲۷ درصد) بالایی دارد. همچنین ترتیب غلظت کل عناصر به‌صورت نیتروژن > فسفر > آهن > روی > مس > منگنز است. علاوه بر این، لجن حاوی برخی عناصر سنگین از قبیل سرب، کادمیوم، کروم و نیکل می‌باشد که به‌طور خلاصه غلظت کل عنصر سرب > کروم > نیکل > کادمیوم است. در این جدول دیده می‌شود که غلظت عناصر سنگین موجود در لجن کمتر از حد مجاز ارائه شده توسط بخش ثبت مواد کودی موسسه تحقیقات خاک می‌باشد. بر این اساس این لجن به‌عنوان کود قابل استفاده در کشاورزی است. جهت حذف آلودگی‌های بیولوژیکی احتمالی نیز قبل از استفاده لجن در دمای ۸۵ درجه سلسیوس به‌مدت ۴۸ ساعت استریل و خشک شد.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های خاک و لجن فاضلاب

Table 1. Some physicochemical properties of soil samples and sewage sludge (SS)

Soil texture	Clay	Silt	Sand	pH	EC	OC	TNV	N	K	P	Fe	Mn	Zn	Cu
		(%)		-	dsm^{-1}		(%)					mg kg^{-1}		
SL	14	16	70	7.48	0.98	0.75	19.25	0.068	230	12	4.4	3.7	0.65	0.84
CL	28	30	42	7.82	1.88	0.33	22.00	0.032	463	16	3.1	3.5	0.80	0.57

Sewage sludge analysis

	pH	EC	Total N	P	OC	Fe	Mn	Zn	Cu	Pb	Cd	Ni	Cr
	-					(%)				mg kg^{-1}			
SS	7.2	4.3	7.12	3.28	36.27	0.52	0.012	0.077	0.02	81.5	2.75	9.73	17.53

SL: Sandy loam, CL: Clay loam, SS: Sewage sludge, pH and EC were measured in 1:10 SS to water ratio,

تأثیر لجن فاضلاب بر برخی ویژگی‌های رویشی

درصد جوانه‌زنی، تعداد برگ

در جدول ۲، تأثیر مقادیر مختلف لجن بر تعداد برگ و درصد جوانه‌زنی گیاه ذرت ارائه شده است. اثر کاربرد لجن بر تغییرات درصد جوانه‌زنی در خاک لوم رسی معنی‌دار ($P<0.01$)، اما در خاک لوم شنی غیرمعنی‌دار بود. بر اساس نتایج مقایسه میانگین (جدول ۳)، در هر دو خاک لوم رسی و لوم شنی کاربرد مقادیر ۰/۱۲۵ تا ۱ درصد لجن فاضلاب درصد جوانه‌زنی را افزایش داد اما مقادیر به دست آمده از نظر آماری معنی‌دار نبود. در مقابل، کاربرد ۱۰ درصد لجن میزان جوانه‌زنی را در مقایسه با تیمار شاهد در خاک لوم رسی و لوم شنی به ترتیب ۲۷/۵۹ و ۳/۴۵ درصد کاهش داد که در خاک لوم شنی این مقدار کاهش معنی‌دار نبود. در هر دو خاک لوم رسی و لوم شنی لجن فاضلاب موجب افزایش معنی‌دار تعداد برگ گردید ($P<0.01$). در خاک لوم رسی بیشترین تعداد برگ در تیمار ۱ درصد لجن مشاهده گردید (جدول ۳)، در مقابل، مقدار ۱۰ درصد لجن در خاک تعداد برگ را در مقایسه با

[1] Flame Photometer

تیمار شاهد ۱۳/۲۱ درصد کاهش داد. در خاک لوم شنی نیز، کاربرد لجن تعداد برگ را در مقایسه با تیمار شاهد افزایش داد که بین تیمارهای ۰/۱۲۵ تا ۱ درصد از نظر آماری تفاوتی مشاهده نشد. در خاک لوم شنی نیز مشاهده شد که تیمار ۱۰ درصد تعداد برگ را در مقایسه با شاهد، ۵۸/۱۸ درصد کاهش داد (جدول ۳). بررسی‌ها نشان داده است که لجن فاضلاب به‌دلیل غنی بودن از مواد آلی و عناصر غذایی پرمصرف مانند نیتروژن و فسفر، باعث بهبود شرایط خاک و افزایش رشد گیاه می‌شود (Zahra *et al*., 2019; Qayyum *et al*., 2015; Bettiol & Ghini, 2011). فراهمی فسفر و نیتروژن برای گیاه می‌تواند رشد ریشه و ساقه‌چه را تحریک کرده و در نتیجه، توانایی گیاه در جذب آب و عناصر غذایی را افزایش داده و از این طریق درصد جوانه‌زنی گیاه را افزایش دهد. همچنین گزارش شده است که کاربرد لجن موجب افزایش تعداد برگ و شاخص رشد گیاهانی مانند برنج (Mahdizadeh *et al*., 2025)، زیتون (Zare *et al*., 2015) و ذرت (Hoseini *et al*., 2023) شده است. با این حال، مصرف مقادیر بالای لجن (مانند ۱۰ درصد) می‌تواند اثر منفی بر رشد گیاه داشته باشد. محققین بیان کردند که یکی از محدودیت اصلی استفاده از لجن فاضلاب پتانسیل آزادسازی فلزات سنگین و تجمع فلزات سنگین در سطوح سمی در بخش فوقانی خاک است (Chlopecka & Adriano, 1997). به‌طوری که، برخی پژوهشگران در بررسی‌های خود وجود فلزات سنگین را دلیل کاهش کیفیت و عملکرد محصولات تحت تأثیر کاربرد مقادیر بالای لجن فاضلاب در خاک می‌دانند (Mitchell *et al*., 1978).

وزن تر و خشک بخش هوایی و ریشه

بر اساس نتایج تجزیه واریانس، در هر دو خاک لوم رسی و لوم شنی تغییرات وزن تر و خشک بخش هوایی و ریشه معنی‌دار بود (جدول۲). در خاک لوم رسی مشاهده گردید که مقادیر ۰/۱۲۵ تا ۱ درصد لجن، وزن تر بخش هوایی را افزایش دادند که بیشترین افزایش مربوط به مقدار ۱ درصد بود. در بخش ریشه نیز، مقادیر ذکر شده موجب افزایش وزن تر ریشه در مقایسه با تیمار شاهد گردید. در هر دو بخش ریشه و بخش هوایی گیاه مشاهده گردید که تیمار ۱۰ درصد لجن در مقایسه با شاهد، وزن تر را به ترتیب ۹/۱۳ و ۵/۸۲ درصد کاهش داد. در خاک لوم شنی مقادیر ۰/۱۲۵ تا ۱ درصد لجن، وزن تر بخش هوایی را افزایش دادند که بیشترین افزایش در هر دو بخش ریشه و بخش هوایی مربوط به مقدار ۰/۵ درصد لجن بود. در مقابل، در هر دو بخش هوایی و ریشه، مقدار ۱۰ درصد لجن وزن تر گیاه را در مقایسه با تیمار شاهد کاهش داد. بررسی مقادیر وزن خشک ریشه و بخش هوایی (جدول ۳)، در هر دو خاک لوم رسی و شنی نشان داد که مقادیر ۰/۱۲۵ تا ۱ درصد لجن وزن خشک بخش هوایی گیاه را در هر دو خاک در مقایسه با تیمار شاهد افزایش داد. اما مقدار ۱۰ درصد لجن موجب کاهش وزن خشک بخش هوایی در خاک‌ها گردید که در خاک لوم شنی اثر کاهش آن بیشتر بود. در بخش ریشه نیز لجن فاضلاب وزن خشک را افزایش داد (به استثنای مقدار ۱۰ درصد). تأثیر مثبت لجن فاضلاب بر خاک و گیاه در بسیاری از مطالعات علمی سال‌های اخیر به اثبات رسیده است (Achkir *et al*., 2023; Kominko *et al*., 2024). به‌عنوان مثال، اثر کاربرد لجن فاضلاب بر افزایش وزن خشک گیاهان زیتون (Zare *et al*., 2015)، کینوا (Afzalinejad *et al*., 2021)، برنج (Mahdizadeh *et al*., 2025) و ذرت (Hoseini *et al*., 2023) گزارش شده است. تسادیلاس و همکاران (Tsadilas *et al*., 1995) بیان کردند که کاربرد لجن فاضلاب می‌تواند ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک را بهبود بخشد و رشد گیاهان زراعی را افزایش دهد. در واقع، کاربرد لجن فاضلاب ممکن است از طریق تغییر در دسترس بودن عناصر غذایی، بر رشد گیاه و کیفیت خاک تأثیر بگذارد (Bai *et al*., 2022).

ارتفاع بخش هوایی

بر اساس نتایج تجزیه واریانس (جدول۲) تغییرات ارتفاع بخش‌هوایی گیاه در زمان‌های مختلف (روز هفتم، ۱۶ام، ۳۰ام و ۴۵ام) و در هر دو خاک لوم رسی و لوم شنی معنی‌دار بود ($P<0.01$). بر اساس نتایج مقایسه میانگین (جدول۴)، در هر دو خاک کاربرد مقادیر مختلف لجن (به استثنای مقدار ۱۰ درصد) موجب افزایش ارتفاع بخش هوایی در مقایسه با تیمار شاهد گردید. در خاک لوم رسی و لوم شنی (روز هفتم رشد)، بیشترین ارتفاع بخش هوایی گیاه در تیمار یک درصد لجن فاضلاب مشاهده گردید که به ترتیب در مقایسه با تیمار شاهد ۴۴/۸۰ و ۳۲/۱۰ درصد افزایش یافت. در روز ۱۶ام نیز، تیمار یک درصد بیشترین

ارتفاع بخش هوایی را در هر دو خاک لوم رسی و لوم شنی داشت و مقدار افزایش به‌ترتیب ۹/۲۳ و ۳۲/۵۹ درصد بود. در روز ۳۰ام و ۴۵ام نتایج مشابهی به‌دست آمد، اما مقدار افزایش در تیمار یک درصد در هر دو خاک در مقایسه با تیمار شاهد، کمتر بود. در مقابل مقدار ۱۰ درصد لجن موجب کاهش ارتفاع بخش هوایی گیاه در مقایسه با تیمار شاهد گردید. مقدار کاهش ارتفاع بخش هوایی در خاک لوم رسی و لوم شنی به ترتیب در روز هفتم: ۱۸/۵۹، ۲۸/۹۲، در روز ۱۶ام: ۳۰/۱۶، ۲۹/۲۸، در روز ۳۰ام: ۲۳/۷۹، ۳۲/۸۴ و در روز ۴۵ ام: ۲۴/۴۳، ۳۳/۲۸ درصد بود (جدول۴). کاربرد لجن فاضلاب به‌دلیل تأمین عناصر غذایی و بهبود خصوصیات خاک، تأثیر مثبتی بر ارتفاع گیاهان دارد. زارع و همکاران (Zare *et al*., 2015) گزارش کردند که کاربرد لجن فاضلاب تا سطح ۱۵۰ تن در هکتار در خاک زیر کشت زیتون، به‌طور معنی‌داری ارتفاع گیاه را افزایش داد، که این اثر به بهبود ماده آلی خاک و افزایش فراهمی عناصر غذایی مانند نیتروژن، فسفر و پتاسیم نسبت داده شد. فلاحتی و همکاران (Felahati *et al*., 2024) نیز در مطالعه‌ای بر روی چای ترش تحت تنش خشکی نشان دادند که افزودن۱۰ گرم لجن فاضلاب به ازای هر کیلوگرم خاک، ارتفاع گیاه را در مقایسه با تیمار شاهد ۲۴ درصد افزایش داد. همچنین، مهدی‌زاده و همکاران (Mahdizadeh *et al*., 2025) در بررسی اثر لجن فاضلاب بر برنج در خاک آلوده به سرب، افزایش معنی‌دار ارتفاع بوته را گزارش کردند، که این امر به‌دلیل بهبود تغذیه گیاه و افزایش ماده آلی خاک بود. نتایج مشابهی در مطالعات دیگر روی گیاهانی مانند ذرت (Hoseini *et al*., 2023) و کینوا (Afzalinejad *et al*., 2021) مشاهده شده است، که نشان‌دهنده تأثیر مثبت لجن بر رشد طولی گیاه به‌دلیل بهبود شرایط خاک و فراهمی عناصر غذایی است. با این حال، در مقادیر بالای لجن (۱۰ درصد)، کاهش ارتفاع گیاه مشاهده شد که احتمالاً به دلیل تجمع فلزات سنگین در خاک است. برخی پژوهشگران در بررسی‌های خود وجود فلزات سنگین را دلیل کاهش کیفیت و عملکرد محصولات تحت تأثیر کاربرد مقادیر بالای لجن فاضلاب در خاک می‌دانند (Mitchell *et al*., 1978).

سرعت رشد

همانطور که نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان داد، تأثیر لجن فاضلاب بر سرعت رشد گیاه در خاک لوم رسی و لوم شنی معنی‌دار بود. بررسی سرعت رشد گیاه در روزهای ۱۶ام، ۳۰ام و ۴۵ام (جدول۴) نشان داد که در خاک لوم رسی و در روز ۱۶ام، سرعت رشد در مقادیر ۰/۱۲۵ تا ۱ درصد لجن در مقایسه با تیمار شاهد تا حدودی کاهش نشان داد، اما این کاهش از نظر آماری معنی‌دار نبود. ضمن اینکه مقدار ۱۰ درصد لجن موجب کاهش معنی‌دار سرعت رشد در مقایسه با تیمار شاهد گردید. در روز ۳۰ام مشاهده گردید که تیمار لجن سرعت رشد گیاه را بهبود بخشید که بیشترین تأثیر مربوط به مقدار ۰/۵ درصد لجن بود. ضمن اینکه از نظر آماری بین مقادیر ۰/۱۲۵ تا ۱ درصد مشاهده نشد. در روز ۴۵ام نیز نتایج مشابهی به‌دست آمد، به‌طوری که تیمار ۰/۵ درصد لجن بیشترین افزایش سرعت رشد را در این بازه زمانی داشت. در این مرحله تیمار ۱۰ درصد موجب کاهش ۲۹/۵۸ درصدی سرعت رشد گردید. به‌طور کلی، در خاک لوم رسی بررسی سرعت رشد گیاه در کل دوره رشد (۴۵ روز) نشان داد که لجن فاضلاب سرعت رشد گیاه را بهبود بخشید و بیشترین تأثیر مربوط به مقادیر ۰/۵ و ۱ درصد بود. اما مقدار ۱۰ درصد رشد گیاه را ۲۴/۶۸ درصد کاهش داد. در خاک لوم شنی و در روز ۱۶ام، مقادیر ۰/۱۲۵ تا ۱ درصد سرعت رشد گیاه را در مقایسه با تیمار شاهد افزایش داد که بیشترین افزایش مربوط به مقدار ۱ درصد لجن بود (جدول ۴). در مقابل، مقدار ۱۰ درصد لجن موجب کاهش معنی‌دار (۳۰/۰۹ درصد) سرعت رشد در مقایسه با تیمار شاهد شد. در روز ۳۰ام، مشاهده گردید که مقدار ۰/۵ درصد لجن سرعت رشد گیاه را بهبود بخشید. ضمن اینکه از نظر آماری بین مقادیر ۰/۱۲۵ تا ۰/۵ درصد تفاوتی مشاهده نشد. در این مرحله از رشد، مقدار ۱۰ درصد لجن سرعت رشد گیاه را در مقایسه با تیمار شاهد ۵۵/۹۲ درصد کاهش داد که از نظر آماری این مقدار کاهش، معنی‌دار بود. در روز ۴۵ام نیز نتایج مشابهی به‌دست آمد، به‌طوری که تیمار ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد لجن بیشترین افزایش سرعت رشد را بین روز ۳۰ و ۴۵ام اشتند. در این مرحله رشد تیمار ۱ و ۱۰ درصد به ترتیب سرعت رشد گیاه را ۱۰/۱۲ و ۳۶/۷۱ درصد کاهش دادند. بررسی میانگین سرعت رشد گیاه در کل دوره کشت (۴۵ روز) در خاک لوم شنی نشان داد که مقادیر ۰/۱۲۵ تا ۱ درصد لجن سرعت رشد گیاه را افزایش داد که در بین این مقادیر، بیشترین مقدار افزایش (۲۶/۱۵ درصد) مربوط به مقدار ۰/۵ درصد

لجن بود. مقدار ۱۰ درصد لجن سرعت رشد کل دوره را ۳۳/۲۳ درصد کاهش داد که این مقدار از کاهش از نظر آماری معنی‌دار بود (جدول۴). نتایج مشابهی در رابطه با افزایش رشد گیاه تحت تأثیر کاربرد لجن فاضلاب در گیاه ذرت (Çakır & Çimrin, 2020)، چای ترش (Felahati *et al*., 2024)، آفتابگردان (Belhaj *et al*., 2016) و خیار (Eid *et al*., 2017) گزارش شده است. لجن فاضلاب سرشار از مواد آلی، عناصر پر مصرف ضروری مانند نیتروژن، فسفر، پتاسیم و عناصر کم مصرف ضروری مانند آهن، روی و مس است (Balkrishna *et al*., 2025). بوستانی و رونقی (Boostani & Ronaghi, 2012) گزارش دادند که کاربرد لجن فاضلاب قابلیت دسترسی عناصر غذایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم را در سه کلاس بافتی خاک آهکی (شنی، لوم رسی و لوم شنی) افزایش داد. بر همین اساس، افزایش توانایی جذب فسفر، نیتروژن و پتاسیم میزان فتوسنتز را در گیاه افزایش داده و در نتیجه آن رشد گیاه افزایش می‌یابد (Yusuf *et al*., 2017). در واقع، استفاده از لجن فاضلاب در خاک با فراهم کردن عناصر غذایی مانند نیتروژن و فسفر، رشد گیاه را تسهیل می‌کند (Placek *et al*., 2016). لذا، افزودن لجن به خاک بخشی از نیاز غذایی گیاه را تأمین می‌کند و در نتیجه آن، رشد گیاه افزایش می‌یابد.

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس اثر کاربرد لجن فاضلاب در خاک‌های لوم رسی و لوم شنی بر برخی ویژگی‌های رشدی گیاه ذرت

Table 2. ANOVA results for the effect of sewage sludge application on some growth characteristics of maize (*Zea mays* L.) in clay- and sandy loam soils

Soils	S.O.V	Mean Square								
		Shoot height (cm) at day				Growth rate in the stage				
		5	Seventh	Sixteenth	Thirtieth	Forty fifth	First	second	third	total
Clay loam	SS	12	11.10**	63.18**	106.48**	148.81**	0.39**	0.221*	0.009*	0.074**
	error	-	0.81	4.85	4.99	4.94	0.062	0.062	0.003	0.002
	CV (%)		9.98	6.84	5.22	4.58	9.64	16.44	20.13	4.56
			dry weight		fresh weight		germination		leaf number	
			shoot	root	shoot	root				
	SS	5	0.18*	0.19**	6.64*	5.63**	400.00**		9.26**	
	error	12	0.05	0.02	1.87	0.46	33.33		1.06	
	CV (%)	-	12.76	9.87	13.28	7.22	6.18		5.69	
			Shoot height (cm) at day				Growth rate in the stage			
			Seventh	Sixteenth	Thirtieth	Forty fifth	First	second	third	total
Sandy loam	SS	5	14.82**	244.69**	307.30**	363.38**	1.77**	0.149*	0.007ns	0.179**
	error	12	2.65	1.69	1.82	5.19	0.049	0.03	0.007	0.003
	CV (%)	-	14.61	3.03	2.84	4.29	6.27	28.42	34.17	4.29
			dry weight		fresh weight		germination		leaf number	
			shoot	root	shoot	root				
	SS	5	1.39**	0.43**	50.57**	20.55**	22.22ns		72.32**	
	error	12	0.015	0.011	2.56	0.73	16.67		4.72	
	CV (%)	-	6.52	9.40	11.15	9.08	4.18		12.5	

ns Non-significant, *,** Significant at 5 and 1% probability level, respectively based on Duncan's multiple range test (at the 5% significance level), SS: sewage sludge, S.O.V: Source of variation

جدول ۳- مقایسات میانگین اثر کاربرد لجن فاضلاب بر برخی ویژگی‌های رویشی گیاه ذرت در خاک‌های لوم رسی و لوم شنی

Table 3. Mean comparison of sewage sludge application effect on some growth characteristics of maize (*Zea mays* L.) in clay- and sandy loam soils

	sewage sludge (%)	germination	leaf number	dry weight		fresh weight	
				shoot	root	shoot	root
clay loam	Control	96.67±3.3a	17.67±0.3b	1.56±0.06bc	0.93±0.05b	8.99±0.5bc	8.00±0.3b
	0.125	100.0±0.0a	18.00±0.6b	1.59±0.11bc	1.41±0.14a	9.60±0.5bc	10.39±0.1a
	0.25	96.67±3.3a	17.67±0.7b	1.69±0.09bac	1.46±0.07a	11.09±0.8ba	10.40±0.8a
	0.5	96.67±3.3a	19.00±0.6ba	1.87±0.23ba	1.47±0.03a	11.35±1.2ba	10.01±0.1a
	1	100.0±0.0a	20.67±0.3a	2.04±0.05a	1.37±0.03a	12.24±1.0a	10.14±0.3a
	10	70.00±5.7b	15.33±0.9c	1.33±0.10c	0.96±0.06b	8.47±0.6c	7.27±0.4b
sandy loam	Control	96.67±5.8a	18.33±0.3a	1.50±0.03b	0.97±0.06c	9.74±0.3b	6.66±0.2d
	0.125	96.67±6.7a	21.00±0.6a	2.35±0.10a	1.10±0.00b	16.98±1.7a	9.86±0.4c
	0.25	100.0±3.3a	17.67±2.8a	2.21±0.05a	1.50±0.02a	16.91±0.6a	10.75±0.4bc
	0.5	100.0±3.3a	19.67±0.3a	2.25±0.11a	1.51±0.06a	17.82±1.3a	11.90±0.5a
	1	100.0±5.8a	20.00±0.0a	2.32±0.06a	1.19±0.04b	16.19±0.4a	11.50±0.2ba

10	93.33±6.7^{a}	7.67±0.88^{b}	0.65±0.06^{c}	0.5±0.02^{d}	8.50±0.4^{b}	5.65±0.09^{c}

Means followed by the same letters are not significantly different (P < 0.05) according to Duncan's multiple range test at the 5% significance level

جدول ۴ – مقایسات میانگین اثر کاربرد لجن فاضلاب بر ارتفاع بخش هوایی و سرعت رشد گیاه ذرت در خاک‌های لوم رسی و لوم شنی

Table 4. Mean comparison of sewage sludge application effect on shoot height and growth rate of maize (*Zea mays* L.) in clay-and sandy loam soils

sewage sludge (%)	Shoot height (cm) at day				Growth rate in the stage			
	Seventh	Sixteenth	Thirtieth	Forty-fifth	Sixteenth	Thirtieth	Forty-fifth	total
clay loam								
Control	8.2±0.5^{b}	33.3±0.2^{a}	41.6±1.1^{c}	46.8±0.8^{c}	2.8±0.1^{a}	1.17±0.1^{b}	0.24±0.0^{ba}	1.04±0.0^{c}
0.125	8.3±0.3^{b}	33.2±0.4^{a}	43.7±0.4^{bc}	49.4±0.8^{bc}	2.8±0.1^{a}	1.51±0.1^{ba}	0.26±0.0^{ba}	1.1±0.0^{bc}
0.25	8.3±0.3^{b}	32.5±0.7^{a}	44.6±1.2^{bac}	51.4±1.7^{ba}	2.7±0.1^{a}	1.72±0.1^{a}	0.30±0.0^{a}	1.14±0.0^{ba}
0.5	10.8±0.6^{a}	34.6±0.8^{a}	47.2±2.0^{ba}	54.1±1.8^{a}	2.6±0.1^{a}	1.80±0.2^{a}	0.31±0.0^{a}	1.20±0.0^{a}
1	11.8±0.3^{a}	36.4±2.4^{a}	48.1±1.6^{a}	54.1±1.0^{a}	2.7±0.3^{a}	1.67±0.1^{a}	0.27±0.0^{a}	1.20±0.0^{a}
10	6.7±0.8^{b}	23.3±1.5^{b}	31.7±0.9^{d}	35.3±1.2^{d}	1.8±0.1^{b}	1.2±0.2^{b}	0.17±0.0^{b}	0.78±0.0^{d}
sandy loam								
Control	10.3±0.9^{b}	38.0±0.0^{c}	42.9±0.5^{c}	48.7±1.2^{b}	3.1±0.1^{b}	0.70±0.1^{ba}	0.25±0.1^{a}	1.08±0.0^{b}
0.125	12.0±1.8^{ba}	47.9±0.4^{b}	52.9±1.2^{ba}	58.7±1.7^{a}	4.0±0.2^{a}	0.72±0.1^{ba}	0.26±0.0^{a}	1.3±0.0^{a}
0.25	11.0±0.5^{ba}	46.4±0.2^{b}	51.2±0.1^{b}	57.7±0.5^{a}	3.9±0.1^{a}	0.69±0.0^{ba}	0.28±0.0^{a}	1.28±0.0^{a}
0.5	12.7±0.4^{ba}	48.2±1.2^{ba}	55.0±0.0^{a}	61.5±1.9^{a}	3.9±0.1^{a}	0.98±0.2^{a}	0.29±0.1^{a}	1.37±0.0^{a}
1	13.6±0.9^{a}	50.4±1.0^{a}	54.1±0.2^{a}	59.3±0.2^{a}	4.1±0.2^{a}	0.53±0.1^{bc}	0.24±0.0^{a}	1.32±0.0^{a}
10	7.3±0.3^{c}	26.7±0.9^{d}	28.8±1.4^{d}	32.5±1.4^{c}	2.2±0.1^{c}	0.31±0.1^{c}	0.17±0.0^{a}	0.72±0.0^{c}

Means followed by the same letters are not significantly different (P < 0.05) according to Duncan's multiple range test at the 5% significance level

محتوای کلروفیل و کارتنوئید برگ

بر اساس نتایج تجزیه واریانس (جدول ۵) تأثیر کاربرد لجن فاضلاب بر رنگدانه‌های فتوسنتزی در هر دو خاک لوم رسی و لوم شنی معنی‌دار بود. همانطور که در جدول ۶ نشان داده شده است، میزان کلروفیل a در خاک لوم رسی با افزایش مقدار لجن تا یک درصد، در مقایسه با تیمار شاهد افزایش یافت (P<0.05). بیشترین مقدار افزایش (۴۸/۷۷ درصد) در تیمار یک درصد بود. در خاک لوم شنی نیز مقادیر ۰/۱۲۵ تا ۰/۵ درصد لجن موجب افزایش کلروفیل a گردید (P<0.05). در مقابل، در خاک لوم رسی و لوم شنی مقدار ۱۰ درصد لجن فاضلاب میزان کلروفیل a را در مقایسه با تیمار شاهد به ترتیب ۱/۰۱ و ۲۷/۹۵ درصد کاهش داد. روند تغییرات کلروفیل b نیز مشابه کلروفیل a بود. به‌طوری که در خاک لوم رسی در تیمار یک و ۱۰ درصد لجن مقدار کلروفیل b افزایش یافت که بیشترین افزایش (۴۲/۰۱) مربوط به تیمار یک درصد بود (P<0.01). در خاک لوم شنی بیشترین مقدار افزایش کلروفیلb (۱۰/۹۳ درصد) در تیمار ۰/۵ درصد لجن مشاهده شد (P<0.01). تیمار یک و ۱۰ درصد لجن در خاک لوم شنی مقدار کلروفیل b را در مقایسه با تیمار شاهد کاهش داد. بررسی غلظت کلروفیل کل نیز روند مشابهی را نشان داد، به‌طوری که در خاک لوم رسی بیشترین مقدار کلروفیل کل در تیمار یک درصد و در خاک لوم شنی بیشترین مقدار در تیمار ۰/۵ درصد مشاهده شد. در خاک لوم رسی تیمارهای ۱ و ۱۰ درصد لجن و در خاک لوم رسی تیمار ۱۰ درصد موجب کاهش کلروفیل کل گردید. در هر دو خاک لجن فاضلاب مقدار کارتنوئید برگ را افزایش داد (P<0.01). در خاک لوم رسی، بیشترین مقدار کارتنوئید در تیمار یک درصد مشاهده گردید. در خاک لوم شنی، مقادیر ۰/۱۲۵ تا ۰/۵ درصد مقدار کارتنوئید برگ را افزایش داد؛ اما، با افزایش مقدار لجن در خاک (یک و ۱۰ درصد) افزایش مقدار کارتنوئید، روند کاهش را نشان داد. خاک لوم رسی در تمامی تیمارها عملکرد بهتری نسبت به خاک لوم شنی نشان داد. بلهاج و همکاران Belhaj *et al.*, (2016) گزارش دادند که غلظت کارتنوئید در خاک تیمار شده با لجن فاضلاب افزایش یافت. افزایش کلروفیل در گیاه تحت تأثیر کاربرد لجن توسط افضلی‌نژاد و همکاران (Afzalinejad *et al.*, 2021) در گیاه کینوا، مهدی‌زاده و همکاران (Mahdizadeh *et al.*, 2025) در گیاه ذرت گزارش شده است. بر اساس نتایج آنالیز لجن فاضلاب (جدول ۱)، لجن اضافه شده به خاک حاوی مقادیر بالایی از عناصر آهن، منگنز، روی و مس است. این عناصر برای رشد گیاهان ضروری بوده، نقش کلیدی در سنتز کلروفیل و سلامت کلی

گیاه دارند (Balkrishna *et al*., 2025). به‌عنوان مثال، عنصر آهن برای تولید کلروفیل و حفظ ساختار و عملکرد کلروپلاست مورد نیاز گیاهان است (Saleem *et al*., 2023). بوستانی و رونقی (Boostani & Ronaghi, 2012) گزارش دادند که کاربرد لجن فاضلاب در خاک، مقادیر آهن، روی، مس و منگنز قابل‌استخراج با DTPA را به‌طور معنی‌داری افزایش داد. محققان گزارش کرده‌اند که لجن فاضلاب دارای محتوای بالای ماده آلی است و این مواد آلی توانایی قابل توجهی در کمپلکس‌سازی و تثبیت عناصر معدنی دارند. به‌گونه‌ای که با عناصر ماکرو و میکرو تشکیل کمپلکس داده و انتقال آن‌ها به سلول‌های گیاهی را تسهیل می‌کنند، همچنین به‌عنوان منبعی از عناصر غذایی و انرژی برای میکرو ارگانیسم‌های خاک شناخته می‌شوند که به نوبه خود مسئول فراهم‌سازی عناصر غذایی برای گیاهان هستند (Gerke, 2022; Marzouk *et al*., 2025). بنابراین، افزایش میزان کلروفیل در گیاه احتمالا ناشی از افزایش غلظت عناصر کم‌مصرف در گیاه به واسطه افزودن لجن فاضلاب به خاک بوده است. در مقابل، باقری و همکاران (Bagheri *et al*., 2024) با بررسی تجمع فلزات سنگین در ریشه و اندام هوایی ذرت علوفه‌ای کشت شده در خاک‌های حاوی لجن فاضلاب، گزارش دادند که مصرف لجن فاضلاب باعث افزایش معنی‌دار غلظت عناصر سرب، نیکل و مس در اندام هوایی ذرت شد. بنابراین، کاهش مقدار کارتنوئید و کلروفیل برگ در تیمار ۱۰ درصد لجن را می‌توان به جذب برخی عناصر سنگین توسط گیاه تحت تأثیر کاربرد لجن فاضلاب حاوی عناصر سنگین در خاک نسبت داد.

مواد جامد محلول و فعالیت آنتی اکسیدانی

بر اساس نتایج تجزیه واریانس (جدول ۵)، اثر لجن فاضلاب در هر دو خاک لوم رسی و لوم شنی بر مواد جامد محلول کل برگ معنی‌دار بود ($P<0.01$). در هر دو خاک کاربرد مقادیر مختلف لجن موجب افزایش مواد جامد محلول برگ گردید (جدول۶). در خاک لوم رسی بیشترین مقدار افزایش مواد جامد محلول در مقایسه با تیمار شاهد در تیمار ۰/۵ درصد لجن مشاهده گردید که مقدار افزایش برابر با ۳۹/۲۱ درصد بود. در خاک لوم شنی نیز بیشترین مقدار افزایش مواد جامد محلول در مقادیر ۰/۱۲۵ تا ۱ درصد لجن مشاهده شد که از نظر آماری تفاوت معنی‌داری با یکدیگر نداشتند. تیمار ۱۰ درصد لجن نیز مقدار مواد جامد محلول برگ را در خاک لوم رسی (۱۲/۲۷ درصد) و لوم شنی (۱۶/۰۴ درصد) افزایش داد، اما مقدار افزایش در مقایسه با سایر تیمارهای لجن، کمتر بود.

بررسی تغییرات فعالیت آنتی اکسیدانی (جدول ۶) نیز نشان داد که در هر دو خاک مقادیر مختلف لجن فاضلاب به استثنای مقدار ۱۰ درصد، میزان فعالیت آنتی اکسیدانی را در مقایسه با تیمار شاهد افزایش داد. (جدول۵)

جدول ۱. در خاک لوم رسی و لوم شنی میزان فعالیت آنتی اکسیدانی تحت تأثیر تیمار ۱۰ درصد لجن در مقایسه با تیمار شاهد به ترتیب ۴/۵۴ و ۱۹/۴۳ درصد کاهش یافت. کاربرد لجن در خاک بسته به مقدار و دفعات استفاده، می‌تواند با خطر تجمع بلندمدت عناصر پرخطر در خاک و جذب آن‌ها توسط گیاهان همراه باشد (Feng *et al*., 2023). به‌عنوان مثال، بلهاج و همکاران Belhaj *et al*., (2016) گزارش دادند که افزودن لجن فاضلاب منجر به افزایش قابل‌توجه غلظت سرب در خاک گردید. گزارش شده است که با افزایش میزان کاربرد لجن، غلظت فلزات نیز در خاک افزایش می‌یابد (Merrington *et al*., 2003). بنابراین، کاربرد لجن فاضلاب حاوی عناصر سنگین در خاک می‌تولند موجب افزایش غلظت این عناصر در گیاه شود. در نتیجه، قرار گرفتن گیاهان در معرض تنش‌های زیستی و غیرزیستی، از جمله تنش ناشی از فلزات سنگین، ممکن است منجر به بروز تنش اکسیداتیو گردد (Adrees *et al*., 2015). در چنین شرایطی، گیاهان با فعال‌سازی سیستم آنتی‌اکسیدانی، در برابر تنش‌ها محافظت می‌شوند (Lakhdar *et al*., 2010). در واقع، گیاهان می‌توانند از طریق تولید و سنتز آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی مختلف، آنتی‌اکسیدان‌های غیرآنزیمی، اسمولیت‌ها و عوامل کلات‌کننده، استرس ناشی از فلزات سنگین را کاهش دهند (Haisel *et al*., 2019). همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است، لجن فاضلاب حاوی فلزات سرب، کادمیوم، نیکل و کروم است. افزودن لجن به خاک احتمالاً سبب افزایش غلظت عناصر سنگین در خاک و به‌دنبال آن جذب توسط گیاه شده است، فرایندی که می‌تواند تنش در گیاه را القا کرده و نهایتاً منجر به افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی شود. به‌طور کلی، هنگامی که گیاهان در معرض تنش فلزات سنگین قرار می‌گیرند، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی به‌تدریج با افزایش غلظت فلزات سنگین بیشتر می‌شود، اما زمانی که غلظت فلزات سنگین

بیش از حد بالا رود، سیستم آنزیمی حفاظتی تخریب شده و فعالیت آنزیم‌ها کاهش می‌یابد (Chaâbene *et al.*, 2018).

جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس اثر کاربرد لجن فاضلاب بر غلظت کلروفیل، کارتنوئید، مواد جامد محلول و فعالیت آنتی اکسیدانی گیاه ذرت در خاک‌های لوم رسی و لوم شنی

Table 5. Anova results of the application of sewage sludge on Chlorophyll (a, b, total), carotenoids, total soluble solids and antioxidant activity of maize (*Zea mays* L.) in clay- and sandy loam soils

Source of variation	df	Mean Square					
		Chlorophyll			carotenoids	Total leaf soluble solids	antioxidant activity
		a	b	total			
clay loam							
sewage sludge	5	54859.29*	6674.73**	88136.87*	5808.73**	0.796**	26.12^{ns}
error	12	14858.76	1272.40	19880.63	591.70	0.130	8.61
CV (%)	-	15.37	10.60	12.48	17.64	10.27	5.57
sandy loam							
sewage sludge	5	31810.39*	5520.59**	60412.54**	756.01**	1.482**	258.67**
error	12	6300.94	948.72	11011.33	52.99	0.082	5.33
CV (%)	-	14.19	14.28	13.54	5.64	6.97	3.97

^{ns} Non-significant, *,** Significant at 5 and 1% probability level, respectively based on Duncan's multiple range test (at the 5% significance level)

جدول ۶- مقایسات میانگین اثر کاربرد لجن فاضلاب بر غلظت کلروفیل، کارتنوئید، مواد جامد محلول و فعالیت آنتی اکسیدانی گیاه ذرت در خاک‌های لوم رسی و لوم شنی

Table 6. Mean comparison of sewage sludge application effect on Chlorophyll (a, b, total), carotenoids, total soluble solids and antioxidant activity of maize (*Zea mays* L.) in clay- and sandy loam soils

	sewage sludge (%)	Chlorophyll (µg mg^{-1})			carotenoids (µg mg^{-1})	Total leaf soluble solids (%)	Antioxidant activity (%)
		a	b	total			
clay loam	Control	711.7±43.7^{b}	277.6±9.8^{c}	989.2±50.6^{b}	94.2±3.1^{b}	3.0±0.2^{c}	51.1±0.6^{ba}
	0.125	726.9±61.0^{b}	292.7±16.8^{c}	1019.6±53.7^{b}	123.0±6.4^{b}	3.2±0.2^{c}	50.5±1.1^{ba}
	0.25	750.6±8.8^{b}	318.4±3.1^{bc}	1069.0±11.9^{b}	125.5±6.1^{b}	3.1±0.3^{c}	54.9±0.3^{a}
	0.5	806.7±49.1^{b}	375.2±5.1^{ba}	1181.8±48.0^{b}	195.1±11.7^{a}	4.2±0.2^{a}	54.8±1.4^{a}
	1	1058.8±104.5^{a}	394.2±45.0^{a}	1452.9±149.5^{a}	189.6±30.5^{a}	4.0±0.1^{ba}	56.0±2.1^{a}
	10	704.5±103.3^{b}	360.7±10.4^{ba}	1065.2±97.6^{b}	99.9±5.6^{b}	3.4±0.2^{bc}	48.8±3.0^{b}
sandy loam	Control	555.6±15.9^{ba}	224.9±25.9^{ba}	780.5±41.8^{ba}	108.5±1.2^{c}	3.0±0.1^{b}	52.2±1.2^{c}
	0.125	537.4±34.4^{bc}	245.3±12.7^{a}	782.8±47.0^{ba}	140.5±5.5^{a}	4.7±0.2^{a}	66.9±1.3^{a}
	0.25	651.7±55.6^{ba}	246.6±12.4^{a}	898.2±60.7^{ba}	138.4±4.3^{ba}	4.4±0.1^{a}	61.6±0.6^{b}
	0.5	690.4±47.6^{a}	249.5±14.6^{a}	939.9±61.9^{a}	147.6±2.8^{a}	4.4±0.2^{a}	63.4±2.5^{ba}
	1	520.3±53.9^{bc}	184.0±18.7^{bc}	704.3±72.6^{bc}	126.8±2.5^{b}	4.6±0.1^{a}	62.8±0.2^{ba}
	10	400.3±53.9^{c}	144.0±18.7^{c}	544.3±72.6^{c}	112.6±6.4^{c}	3.5±0.2^{b}	42.1±0.8^{d}

Means followed by the same letters are not significantly different ($P < 0.05$) according to Duncan's multiple range test at the 5% significance level

تأثیر لجن بر غلظت فسفر، نیتروژن و پتاسیم بخش هوایی و ریشه

نتایج بررسی غلظت عناصر غذایی در بخش هوایی و ریشه گیاه نشان داد که استفاده از مقادیر مختلف لجن فاضلاب در خاک تأثیر معنی‌داری بر غلظت فسفر، نیتروژن و پتاسیم داشت (جدول ۷). مطابق با داده‌های ارائه شده در جدول ۸، کاربرد لجن فاضلاب موجب افزایش قابل توجه غلظت فسفر بخش هوایی و ریشه گیاه در هر دو خاک لوم رسی و لوم شنی شد. در خاک لوم رسی بیشترین غلظت فسفر بخش هوایی و ریشه مربوط به تیمار ۱۰ درصد لجن بود که در مقایسه با تیمار شاهد مقدار افزایش معنی‌دار بود. در خاک لوم شنی لجن فاضلاب غلظت نیتروژن بخش

هوایی و ریشه را به‌طور معنی‌داری افزایش داد (جدول ۷). در خاک لوم رسی، اگرچه تفاوت معنی‌داری در غلظت نیتروژن بخش هوایی بین تیمارهای ۰/۱۲۵ و ۰/۲۵ درصد و همچنین بین ۰/۵ و ۱ درصد مشاهده نگردید، اما بیشترین غلظت نیتروژن بخش هوایی (۶/۵۵ درصد) و ریشه (۵/۰۷ درصد) مربوط به تیمار ۱۰ درصد لجن بود (جدول ۸). در خاک لوم شنی نیز بیشترین غلظت نیتروژن بخش هوایی (۶/۴۹ درصد) و ریشه (۶/۱۳ درصد) در تیمار ۱۰ درصد لجن به دست آمد. بررسی نتایج مقایسه میانگین غلظت پتاسیم نیز نشان داد که غلظت پتاسیم در ریشه و بخش هوایی گیاه تحت تأثیر کاربرد لجن فاضلاب به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (جدول ۸). مشابه با نتایج فسفر و نیتروژن، بیشترین غلظت پتاسیم در هر دو خاک و در هر دو بخش گیاه، مربوط به تیمار ۱۰ درصد لجن بود. در خاک لوم رسی، تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای ۰/۱۲۵ و ۰/۲۵ درصد و همچنین بین ۰/۵ و یک درصد از نظر غلظت پتاسیم بخش هوایی مشاهده نشد. در خاک لوم شنی نیز تغییر معنی‌داری در غلظت پتاسیم بخش هوایی بین تیمارهای شاهد، ۰/۱۲۵، ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد لجن مشاهده نگردید. لجن فاضلاب شهری سرشار از ترکیبات فسفر و نیتروژن با قابلیت جذب آسان برای گیاه است (Serwecińska *et al*., 2024) و به‌عنوان منبعی ارزشمند از نیتروژن، پتاسیم و فسفر برای رشد گیاه به شمار می‌رود (Nahar *et al*., 2024; Balkrishna *et al*., 2025). به‌عنوان مثال، نیتروژنی که در لجن فاضلاب باقی می‌ملند معمولاً ۲ تا ۶ درصد از وزن خشک کل آن را تشکیل می‌دهد (Horttanainen *et al*., 2017) و حدود ۸۰ درصد نیتروژن موجود در لجن فاضلاب عمدتا به شکل آلی (عمدتا پروتئین‌ها) است که پس از تجزیه بیولوژیکی مواد آلی، برای گیاهان قابل دسترس خواهد بود (Rigby *et al*., 2016). حسین (۲۰۰۹) دریافت که در خاک‌های شنی و آهکی با افزایش مقدار لجن فاضلاب، غلظت فسفر و پتاسیم قابل جذب خاک افزایش یافت. قیوم و همکاران (Qayyum *et al*., 2015) نیز گزارش دادند که کاربرد لجن فاضلاب موجب افزایش فسفر خاک می‌شود. بنابراین، کاربرد لجن در خاک می‌تواند میزان فراهمی این عناصر را برای گیاهان افزایش دهد و افزایش تولنایی جذب فسفر، نیتروژن و پتاسیم می‌تواند موجب افزایش فتوسنتز در گیاه شده و در نتیجه آن رشد گیاه افزایش پیدا کند (Yusuf *et al*., 2017). ضمن اینکه، با افزایش جذب فسفر، رشد و توسعه ریشه بهبود می‌یابد که در نتیجه آن، جذب عناصر پرمصرف و کم‌مصرف افزایش یافته و در نهایت موجب افزایش زیست توده اندام هوایی می‌شود (Hussain *et al*., 2011). همانطور که بیان شد، کاربرد لجن فاضلاب غلظت فسفر بخش هوایی و ریشه را افزایش داد که می‌تواند ناشی از افزایش غلظت فسفر در نتیجه کاربرد لجن در خاک باشد (جدول ۸). بوستانی و رونقی (Boostani & Ronaghi, 2012) در مطالعه‌ای روی ذرت نشان دادند که افزودن لجن فاضلاب به خاک‌های آهکی (شنی، لوم رسی و لوم شنی) به‌طور معنی‌داری نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم قابل جذب خاک را افزایش داد، که منجر به بهبود تغذیه گیاه شد؛ هرچند افزایش پتاسیم کمتر از نیتروژن و فسفر بود که دلیل آن را به محتوای پایین‌تر پتاسیم در لجن نسبت دادند. نجفی و همکاران (Najafi *et al*., 2012) نیز گزارش کردند که کاربرد لجن فاضلاب غلظت فسفر را در اندام هوایی و ریشه گیاه آفتابگردان افزایش داد. در تحقیقی دیگر گزارش گردید که کاربرد ۴۰ تن لجن در هکتار، غلظت نیتروژن و فسفر بخش هوایی در گیاه کینوا را به‌طور معنی‌داری افزایش داد (Afzalinejad *et al*., 2021). همچنین افزایش غلظت فسفر ریشه و بخش هوایی گیاه ذرت تحت تأثیر کاربرد لجن فاضلاب گزارش شده است (Hoseini *et al*., 202). این نتایج نشان‌دهنده تأثیر مثبت لجن فاضلاب بر افزایش فراهمی و جذب نیتروژن و فسفر در گیاهان است، اما اثر لجن بر پتاسیم ممکن است به‌دلیل محتوای کمتر این عنصر در لجن، محدودتر باشد. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد لجن فاضلاب در خاک‌های لوم رسی و لوم شنی به‌دلیل تفاوت در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی این خاک‌ها، اثرات متفاوتی بر رشد و تغذیه گیاه دارد و اثر مثبت لجن در خاک لوم رسی بیشتر از خاک لوم شنی بوده است.

جدول ۷- نتایج تجزیه واریانس اثر کاربرد لجن فاضلاب بر غلظت نیتروژن، فسفر و پتاسیم گیاه ذرت در خاک‌های لوم رسی و لوم شنی

Table 3. ANOVA results for the effect of sewage sludge application on phosphorus (P) nitrogen (N), and potassium (K) concentrations in maize (*Zea mays* L.) grown in clay- and sandy loam soils.

Source of variation	df	Mean Square		
		P	N	K

		shoot	root	shoot	root	shoot	root
clay loam							
sewage sludge	5	0.0034**	0.0032**	0.27**	0.086**	0.18**	0.48**
error	12	0.000077	0.00012	0.016	0.0037	0.0039	0.010
CV (%)	-	9.56	7.65	2.05	1.26	1.65	3.93
sandy loam							
sewage sludge	5	0.014**	0.18**	0.31**	0.87**	0.66**	0.95**
error	12	0.000089	0.00022	0.017	0060	0.0085	0.0035
CV (%)	-	7.82	5.01	2.17	1.41	2.65	2.30

** Significant at 1% probability level based on Duncan's multiple range test (at the 5% significance level)

جدول ۸- مقایسات میانگین اثر کاربرد لجن فاضلاب بر غلظت فسفر، نیتروژن و پتاسیم گیاه ذرت در خاک‌های لوم رسی و لوم شنی

Table 8. Mean comparison of sewage sludge application effect on phosphorus (P), nitrogen (N), and potassium (K) concentrations in maize (Zea mays L.) grown in clay-and sandy loam soils

	sewage sludge (%)	P		N		K	
		shoot	root	shoot	root	shoot	root
clay loam	Control	0.03±0.003^{d}	0.11±0.00^{d}	5.72±0.08^{e}	4.62±0.02^{d}	3.48±0.03^{d}	2.14±0.03^{e}
	0.125	0.07±0.003^{c}	0.12±0.01^{d}	5.99±0.07^{d}	4.7±0.03^{cd}	3.61±0.03^{c}	2.35±0.06^{d}
	0.25	0.11±0.003^{b}	0.13±0.01^{cd}	6.18±0.04^{dc}	4.77±0.02^{cb}	3.72±0.03^{c}	2.38±0.08^{dc}
	0.5	0.10±0.003^{b}	0.14±0.00^{cb}	6.25±0.07^{bc}	4.82±0.01^{b}	3.84±0.03^{b}	2.56±0.08^{c}
	1	0.11±0.006^{b}	0.16±0.00^{b}	6.45±0.06^{ba}	4.99±0.06^{a}	3.88±0.05^{b}	2.77±0.07^{b}
	10	0.13±0.009^{a}	0.20±0.01^{a}	6.55±0.10^{a}	5.07±0.05^{a}	4.18±0.04^{a}	3.27±0.02^{a}
sandy loam	Control	0.04±0.00^{f}	0.16±0.01^{d}	5.70±0.10^{d}	4.53±0.02^{e}	3.18±0.06^{c}	2.08±0.04^{f}
	0.125	0.08±0.00^{e}	0.19±0.01^{c}	5.73±0.12^{d}	5.52±0.05d^{c}	3.19±0.01^{c}	2.25±0.03^{e}
	0.25	0.10±0.01^{d}	0.20±0.00^{cb}	6.02±0.05^{c}	5.49±0.08^{d}	3.29±0.04^{c}	2.38±0.02^{d}
	0.5	0.12±0.01^{c}	0.22±0.01^{cb}	6.17±0.04^{bc}	5.64±0.05^{c}	3.31±0.03^{c}	2.52±0.04^{c}
	1	0.16±0.00^{b}	0.22±0.01^{b}	6.39±0.07^{ba}	5.80±0.02^{b}	3.55±0.06^{b}	2.67±0.03^{b}
	10	0.23±0.01^{a}	0.80±0.01^{a}	6.46±0.05^{a}	6.13±0.02^{a}	4.41±0.09^{a}	3.66±0.04^{a}

Means followed by the same letters are not significantly different ($P < 0.05$) according to Duncan's multiple range test at the 5% significance level

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد لجن فاضلاب شهری با مقادیر ۰/۱۲۵ تا یک درصد وزنی-وزنی، موجب بهبود شاخص‌های رشدی گیاه ذرت گردید. این اثرات شامل افزایش وزن تر و خشک، ارتفاع و سرعت رشد گیاه، غلظت کلروفیل و کاروتنوئید، فعالیت آنتی‌اکسیدانی و همچنین افزایش غلظت عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم در گیاه بود. با این وجود هنگامی که مقدار ۱۰ درصد وزنی-وزنی لجن فاضلاب به خاک اضافه شد، مشاهده گردید که اکثر ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در گیاه کاهش یافت، که نشان‌دهنده اثر منفی این مقدار لجن بر رشد گیاه است. این اثر احتمالاً ناشی از وجود عناصر سنگین مانند سرب، کادمیوم، نیکل و کروم در لجن فاضلاب است که معمولا طی فرآیند تصفیه فاضلاب شهری همراه با لجن باقی می‌مانند. همچنین مشاهده شد که اثر مثبت کاربرد لجن فاضلاب در خاک با بافت لوم رسی، نسبت به خاک لوم شنی بیشتر بود. بر اساس این نتایج، می‌توان نتیجه گرفت که پاسخ گیاه ذرت به لجن فاضلاب وابسته به نوع خاک و میزان کاربرد آن است. بنابراین، تعیین مقدار مناسب و بررسی دقیق ویژگی‌های شیمیایی لجن پیش از استفاده اهمیت ویژه‌ای دارد. پیشنهاد می‌شود مطالعات بیشتری برای تدوین استانداردهای کاربردی و کاهش مخاطرات زیست‌محیطی ناشی از لجن فاضلاب انجام شود

.

Reference

Achkir A., Aouragh A., El Mahi M., Lotfi E. M., Labjar N., Bouch M. E., Moussaoui T. E. 2023. Implication of sewage sludge increased application rates on soil fertility and heavy metals contamination risk. *Emerging Contaminants*, *9*(1): 100200.

Adrees M., Ali S., Rizwan M., Zia-ur-Rehman M., Ibrahim M., Abbas F., Irshad M. K. 2015. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of heavy metal toxicity in plants: a review. Ecotoxicology and environmental safety, 119: 186-197.

Afzalinejad F. 2022. Effect of sewage sludge on the phytoremediation of Muteh gold factory tailings by quinoa (*Chenopodium quinoa* L.). *Applied Soil Research*, 9(4): 102-115. (In Persian)

Afzalinejad F., Ghasemi S., Seyfati S. E., Shahbazi S. 2021. The Effect of Sewage Sudge on the Growth and some Nutrient Elements of Three Quinoa Genotypes in a Calcareous and Saline Soil. JWSS-Isfahan University of Technology, 24(4): 127-139. (In Persian)

Akpinar-Bayizit, A., Ozcan, T., Yilmaz-Ersan, L., Yildiz, E. 2016. Evaluation of antioxidant activity of pomegranate molasses by 2, 2-Diphenyl-l-Picrylhydrazyl (DPPH) method. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, 7(1): 71-74.

Arnon A. N. 1967. Method of extraction of chlorophyll in the plants. *Agronomy Journal*, 23:112-121.

Avis T.J., Grave V., Antoun H., Tweddell R.J. 2008. Multifaceted beneficial effects of rhizosphere microorganisms on plant health and productivity. *Soil Biology and Biochemistry*, 40: 1733–1740.

Bagheri Y. R., Golchin A., Rezaei H. Esmaeelnejad L. 2024. Ecological Risk Evaluation of Sewage Sludge to Some Heavy Metals from Municipal Wastewater Treatment Plant in Southern Tehran. *Irrigation and Water Engineering*, 14(4): 371-386. (In Persian)

Bai J., Sun X., Xu, C., Ma X., Huang Y., Fan Z., and Cao X. 2022. Effects of sewage sludge application on plant growth and soil characteristics at a Pinus sylvestris var. mongolica plantation in Horqin Sandy Land. Forests, 13(7), 984.

Balkrishna, A., Kaushik, P., Singh, S., Agrahari, P., Kumar, B., Kumar, P., Arya, V. P. 2025. Potential use of sewage sludge as fertilizer in organic farming. *Cleaner Waste Systems*, 100245.

Belhaj D., Elloumi N., Jerbi B., Zouari M., Abdallah F.B., Ayadi H., and Kallel M. 2016. Effects of sewage sludge fertilizer on heavy metal accumulation and consequent responses of sunflower (*Helianthus annuus*). *Environmental Science and Pollution Research*, 23: 20168–20177.

Bettiol W., Ghini R. 2011. Impacts of sewage sludge in tropical soil: a case study in Brazil. *Applied and Environmental Soil Science*, 2011(1): 212807.

Bolan N., Srivastava P., Rao C.S., Satyanaraya P.V., Anderson G.C., Bolan S., and Kirkham M.B. 2023. Distribution, characteristics and management of calcareous soils. *Advances in Agronomy*, 174: 81–130.

Boostani H. R., Ronaghi A. 2012. Investigation of Some Nutrients Concentration and Corn Yield with Application of Different Sewage Sludge Levels and Chemical Fertilizer in Three Textural Classes of a Calcareous Soil. *Water and Soil*, 26(5): 1092-1100. (In Persian)

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. In: Sparks D.L., Page A.L., Helmke P.A., Loeppert R.H., Soltanpour P.N., Tabatabai M.A., Johnston G.T., and Sumner M.E. (Eds.), Methods of Soil Analysis—Part 3. Chemical Methods—SSSA Book Series No. 5. *Soil Science Society of America and American Society of Agronomy*, Madison, pp. 1085–1121.

Burt R. 2004. Soil survey laboratory methods manual, soil survey investigations, report No. 42, Version 4.0. USDA, Natural Resources Conservation Service, Lincoln, NE, USA.

Çakır H.N., and Çimrin K.M. 2020. The effect of sewage sludge applications on the growth of maize (*Zea mays* L.) and some soil properties. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi, 23(2): 321–327.

Casado-Vela J., Selles S., Dias-Crespo C., Navarro-Pedreno J., Mataix-Beneyto J. Grmez I. 2007. Effect of composted sewage sludge application to soil on sweet pepper crop (Capsicum annuum var. annuum) grown under two exploitation regimes. *Waste Management*, 27: 1509–1518.

Chaâbene Z., Hakim I. R., Rorat A., Elleuch A., Mejdoub H., Vandenbulcke F. 2018. Copper toxicity and date palm (*Phoenix dactylifera*) seedling tolerance: monitoring of related biomarkers. *Environmental toxicology and chemistry*, 37(3): 797-806.

Chapman H. D., Pratt P. F. 1961. Methods of analysis for soils. Plants and waters, 169, 176.

Chlopecka A., Adriano D.C. 1997. Influence of zeolite, apatite and Fe-oxide on Cd and Pb uptake by crops. *Science of the Total Environment*, 207: 195-206.

De Araujo A.S., de Melo W.J. Singh R.P. 2010. Municipal solid waste compost amendment in agricultural soil: changes in soil microbial biomass. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 9: 41–49.

Delibacak S., Voronina L. Morachevskaya E. 2020. Use of sewage sludge in agricultural soils: Useful or harmful. *Eurasian Journal of Soil Science*, 9(2): 126–139.

Desa U.N. 2022. World population prospects 2022. UN Department of Economic and Social Affairs, Population Division, New York.

Eid E.M., Alrumman S.A., El-Bebany A.F., Hesham A.E.L., Taher M.A. and Fawy K.F. 2017. The effects of different sewage sludge amendment rates on the heavy metal bioaccumulation, growth and biomass of cucumbers (*Cucumis sativus* L.). *Environmental Science and Pollution Research*, 24: 16371–16382.

Felahati M., Karimian A. A. Sodaeizadeh H. 2024. The effect of sewage sludge on improving the growth characteristics of the medicinal plant Hibiscus sabdariffa L. under drought stress. *Journal of Arid Biome*, 14(1): 21-33. (In Persian)

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 Bio/Technology*, 22(4): 1037-1058.

Fresques P.R., Francis R.E. Dannis G.L. 1990. Sewage sludge effect on soil and plant quality in a degraded semi-arid grassland. *Journal of Environmental Quality*, 19: 324–329.

Gerke J. 2022. The central role of soil organic matter in soil fertility and carbon storage. *Soil Systems*, 6(2), 33.

Grgas D., Štefanac T., Barešić M., Toromanović M., Ibrahimpašić J., Vukušić Pavičić T. and Landeka Dragičević T. 2023. Co-composting of sewage sludge, green waste, and food waste. Journal of Sustainable Development of Energy, *Water and Environment Systems*, 11(1): 1–14.

Guoqing X., Xiuqin C., Liping B., Hongtao Q. Haibo 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.

Haisel D., Cyrusová T., Vaněk T., Podlipná R. 2019. The effect of nanoparticles on the photosynthetic pigments in cadmium—zinc interactions. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(4): 4147-4151.

Hammond J.P., Broadley M.R. White P.J. 2004. Genetic responses to phosphorus deficiency. *Annals of Botany*, 94(3): 323–332.

Hasan M., Hasan M.R., Khan R.A. Rashid T.U. 2024. Sewage sludge: Is it a sustainable fertilizer or a source of contaminants? In: Kumar A. and Hait S. (Eds.), Environmental Engineering and Waste Management: Recent Trends and Perspectives. Springer Nature Switzerland, Cham, pp. 101–131.

Hoseini S. S., Zalaghi R., Enayatizamir N., Feizian M. 2023. The effect of sewage sludge application on soil phosphatase activity and nutrients uptake by maize plant inoculated with symbiotic fungi. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 13(4): 45-62. (In Persian)

Hunt R. 2012. Basic growth analysis: plant growth analysis for beginners. Springer Science & Business Media, 112p.

Hussain F., Akhtar M., Ashraf M. Y., Qureshi T. M., Anwar-ul-Haq A. U. H., Naeem A. 2011. Evaluation of phosphoric acid as a phosphate fertilizer for wheat production on salt-affected soils. *Agrochemical*, 55(5): 297-304.

Hussein A. H. A. 2009. Impact of sewage sludge as organic manure on some soil properties, growth yield and nutrient content of cucumber crop. *Journal of Applied Sciences*, 9(8):1401–11.

Kniuipytė I., Praspaliauskas M., Venclovienė J., Žaltauskaitė J. 2023. Soil remediation after sewage sludge or sewage sludge char application with industrial hemp and its potential for bioenergy production. *Sustainability*, 15(14): 11296.

Kominko H., Gorazda K. Wzorek Z. 2019. Potentiality of sewage sludge-based organo-mineral fertilizer production in Poland considering nutrient value, heavy metal content and phytotoxicity for rapeseed crops. *Journal of Environmental Management*, 248: 109283.

Kominko H., Gorazda K. Wzorek Z. 2024. Sewage sludge: A review of its risks and circular raw material potential. *Journal of Water Process Engineering*, 63: 105522.

Kulling D., Stadelmann F. Herter U. 2001. Sewage sludge – Fertilizer or waste? UKWIR Conference, Brussels.

Lakhdar A., Iannelli M. A., Debez A., Massacci A., Jedidi N., Abdelly C. 2010. Effect of municipal solid waste compost and sewage sludge use on wheat (Triticum durum): growth, heavy metal accumulation, and antioxidant activity. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 90(6), 965-971.

Leifheit E. F., Kissener H. L., Faltin E., Ryo M., and Rillig M. C. (2022). Tire abrasion particles negatively affect plant growth even at low concentrations and alter soil biogeochemical cycling. *Soil Ecology Letters*, 4(4): 409–415.

Lindsay W.L. Norvell W.A. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42(3): 421–428.

Loeppert R.H. Suarez D.L. 1996. Carbonate and gypsum. 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—SSSA Book Series No. 5. *Soil Science Society of America and American Society of Agronomy*, Madison, pp. 437–474.

Mahdizadeh M., Najafi N., Oustan S., Shirinfekr A. Mahmoud Soltani S. 2025. Effects of rice straw and sewage sludge-derived hydrochars on some agronomic traits and leaf chlorophyll index of rice in a sandy loam soil contaminated with lead (Pb). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56(1): 17-42. (In Persian)

Marzouk S. H., Kwaslema D. R., Omar M. M., Mohamed S. H. 2025. "Harnessing the power of soil microbes: Their dual impact in integrated nutrient management and mediating climate stress for sustainable rice crop production" A systematic review. *Heliyon*, 11(1).

Merrington G., Oliver I., Smernik R. J., and McLaughlin M. J. 2003. The influence of sewage sludge properties on sludge-borne metal availability. *Advances in Environmental Research*, 8(1): 21-36.

Mitchell G. A., Bingham F. T., Page A. L. 1978. Yield and metal composition of lettuce and wheat grown on soils amended with sewage sludge enriched with cadmium, copper, nickel, and zinc, American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and *Soil Science Society of America*, 7(2): 165-171.

Naeem M., Igbal J. Bakhsh M.A.A. 2006. Comparative study of inorganic fertilizers and organic manures on yield and yield component of mung bean (*Vigna radiata* L.). *Journal of Agriculture and Social Science*, 2: 227–229.

Nahar K., Thulasiraman A. V., Vuppaladadiyam A. K., Hakeem I. G., Shah K. 2024. Current understanding on the fate of contaminants during hydrothermal treatment of sewage sludge. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 49, 100960.

Najafi N. Abbasi M. 2014. Effects of Rice (Oryza sativa L.) Cultivation, Sewage Sludge and Chemical Fertilizers on Changes in Iron, Zinc, Copper and Manganese Concentrations in Soil Solution after Submergence. *Applied Soil Research*, 2(1): 1-14. (In Persian)

Najafi N. Mardomi S. 2013. Effects of Sunflower Cultivation, Manure and Sewage Sludge on Availability of Elements, pH and EC of an Alkaline Soil. *Applied Soil Research*, 1(1): 1–16. (In Persian)

Najafi N., Mardomi S. Oustan S. 2013. The effect of waterlogging, sewage sludge and manure on selected macronutrients and sodium uptake by sunflower plant in a loamy sand soil. *Journal of Water and Soil*, 26(3): 619–636. (In Persian)

Najafi N., Mardomi S. Oustan S. 2012. The Effect of Waterlogging, Sewage Sludge and Manure on Selected Macronutrients and Sodium Uptake in Sunflower Plant in a Loamy Sand Soil. *Water and Soil*, 26(3),

Nielson G.H., Hogue E.J., Nielson D. Zebarth B.J. 1998. Evaluation of organic wastes as soil amendments for cultivation of carrot and chard on irrigated sandy soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 78: 217–225.

Nikghadami M., Fotovat A. Khorassani R. 2020. Effect of different levels of domestic sewage sludge on concentration of heavy metals (Zn, Cu, Cd, and Pb) in radish and basil and some of chemical soil properties. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 10(3): 115–134. (In Persian)

Ojeda G., Alcaniz J.M. Ortiz O. 2003. Runoff and losses by erosion in soils amended with sewage sludge. *Land Degradation & Development*, 14(6): 563–573.

Oliveira G.S.D., Jalal A., Prates A.R., Teixeira Filho M.C.M., Alves R.S., Silva L.C. Nogueira T.A.R. 2023. Common bean productivity and micronutrients in the soil–plant system under residual applications of composted sewage sludge. *Plants*, 12(11): 2153.

Olsen S.R. Sommers L. 1982. Phosphorus. In: Page A.L., Miller R.H. and Keeney D.R. (Eds.), Methods of Soil Analysis-Part 2. Chemical and Microbiological Properties—Agronomy Monograph No. 9 (2nd Ed.). *American Society of Agronomy and Soil Science Society of America*, Madison, pp. 421–422.

Paul V., Singh A., Pandey R. 2010. Estimation of total soluble solids (TSS). Laboratory Manual on Post-Harvest Physiology of Fruits and Flowers, 41-43.

Piri M. Sepehr E. 2023. Kinetics of Phosphorus Release from Struvite/Biochar Composites Prepared from Domestic Sewage Sludge. *Applied Soil Research*, 11(2): 113-128. (In Persian)

Placek A., Grobelak A., Kacprzak M., 2016. Improving the phytoremediation of heavy metals contaminated soil by use of sewage sludge. *International journal of phytoremediation*, 18 (6): 605–618.

Qayyum M.F., Ashraf I., Abid M. Steffens D. 2015. Effect of biochar, lime, and compost application on phosphorus adsorption in a Ferralsol. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 178(4): 576–581.

Rahmani H.R., Rezaei H. Rezaei M. 2014. Investigation of some properties of Shahin-Shahr sewage sludge for land application–Isfahan, Iran. *Journal of Applied Environmental and Biological Sciences*, 4(6): 382–387.

Ramulu U.S.S. 2002. Reuse of municipal sewage and sludge in agriculture. Scientific Publishers, Jodhpur, India, 288p.

Rhoades J.D., Manteghi N.A., Shouse P.J. and Alves W.J. 1989. Estimating soil salinity from saturated soil-paste electrical conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 53(2): 428–433.

Rigby H., Clarke B. O., Pritchard D. L., Meehan B., Beshah F., Smith S. R., Porter N. A. 2016. A critical review of nitrogen mineralization in biosolids-amended soil, the associated fertilizer value for crop production and potential for emissions to the environment. *Science of the Total Environment*, 541:1310-1338.

Rusănescu C.O., Rusănescu M., Voicu G., Paraschiv G., Biriș S.Ș. Popescu I.N. 2022. The recovery of vermicompost sewage sludge in agriculture. *Agronomy*, 12(11): 2653.

Rydgård M., Bairaktari A., Thelin G. Bruun S. 2024. Application of untreated versus pyrolysed sewage sludge in agriculture: A life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 454: 142249.

Saleem S., Mushtaq N.U., Rasool A., Shah W.H., Tahir I. Rehman R.U. 2023. Plant nutrition and soil fertility: physiological and molecular avenues for crop improvement. In: Hossain M.A., Kamiya T., Burritt D.J., Tran L.-S.P. and Fujita M. (Eds.), *Sustainable Plant Nutrition. Academic Press*, pp. 23–49.

Serwecińska L., Font-Nájera A., Strapagiel D., Lach, J., Tołoczko W., Bołdak M., Urbaniak M. 2024. Sewage sludge fertilization affects microbial community structure and its resistome in agricultural soils. *Scientific Reports*, 14(1): 21034.

Sharma V., Chauhan R. Kumar R. 2021. Spectral characteristics of organic soil matter: A comprehensive review. *Micro chemical Journal*, 171: 106836.

Singh R.P. Agrawal M. 2007. Effects of sewage sludge amendment on heavy metal accumulation and consequent responses of Beta vulgaris plants. *Chemosphere*, 67(11): 2229–2240.

Singh R.P. Agrawal M. 2008. Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. *Waste Management*, 28(2): 347–358.

Sodaeizadeh H., Karimian A.A., Jafari S.H. Arani A.M. 2024. A preliminary study on heavy metal monitoring in soil and guar (*Cyamopsis tetragonoloba*) biomass amended with sewage sludge. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(2): 201.

Srinivasarao C., Vittal K.P.R., Chary G.R., Gajbhiye P.N. Venkateswarlu B. 2006. Characterization of available major nutrients in dominant soils of rainfed crop production systems of India. *Indian Journal of Dryland Agricultural Research and Development*, 21: 105–113.

Sugurbekova G., Nagyzbekkyzy E., Sarsenova A., Danlybayeva G., Anuarbekova S., Kudaibergenova R., Frochot C., Acherar S., Zhatkanbayev Y. Moldagulova N. 2023. Sewage sludge management and application in the form of sustainable fertilizer. *Sustainability*, 15(7): 6112.

Thomas G.W. 1982. Exchangeable cations. In: Page A.L., Miller R.H. and Keeney D.R. (Eds.), *Methods of Soil Analysis—Part 2. Chemical and Microbiological Properties*—Agronomy Monograph No. 9 (2nd Ed.). American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, pp. 159–165.

Tsadilas, C. D., Matsi, T., Barbayiannis, N., Dimoyiannis, D. 1995. Influence of sewage sludge application on soil properties and on the distribution and availability of heavy metal fractions. *Communications in soil science and plant analysis*, 26(15-16): 2603-2619.

Usman K., Khan S., Ghulam S., Khan M.U., Khan N., Khan M.A. Khalil S.K. 2012. Sewage sludge: an important biological resource for sustainable agriculture and its environmental implications. *American Journal of Plant Sciences*, 3(12): 1708–1721.

Vuaille J., Gravert T.K.O., Magid J., Hansen M. Cedergreen N. 2022. Long-term fertilization with urban and animal wastes enhances soil quality but introduces pharmaceuticals and personal care products. *Agronomy for Sustainable Development*, 42(1): 1–16.

Wahba M., Fawkia L. Zaghloul A. 2019. Management of calcareous soils in arid region. International *Journal of Environmental Pollution and Environmental Modeling*, 2: 248–258.

Walkley A. Black I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1): 29–38.

Yusuf S., Audu A.A. Wazir M. 2017. Comparative assessment of the environmental dynamics of dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved organic phosphorus (DOP) from three wetlands in Northern Nigeria. *Nigerian Journal of Basic and Applied Sciences*, 25(2): 151–162.

Zahra Z., Maqbool T., Arshad M., Badshah M.A., Choi H.K. Hur J. 2019. Changes in fluorescent dissolved organic matter and their association with phytoavailable phosphorus in soil amended with TiO2 nanoparticles. *Chemosphere*, 227: 17–25.

Zare, M., Chorom, M. Moallemi, N. 2015. Effect of Treated Urban Sewage Sludge on Soil Essential Nutrients, Soil Chemical Properties and Physiological Properties of Olive Tree. *Agricultural Engineering*, 37(2): 1-15. (In Persian)

Zuo, W., Gu, C., Zhang, W., Xu, K., Wang, Y., Bai, Y., Dai, Q. (2019). Sewage sludge amendment improved soil properties and sweet sorghum yield and quality in a newly reclaimed mudflat land. *Science of the Total Environment*, 654, 541-549.