J. Soil Plant Interact. 2024; 15(3): 1–16. https://doi.org/10.47176/jspi.15.3.20121

Journal of Soil and Plant Interactions

Journal homepage: https://jspi.iut.ac.ir/

ISSN: 2783-5014 EISSN: 2783-5286

Research Article

Influence of Municipal Sewage Sludge and Triple Superphosphate Application on Some Growth Traits and P Uptake of Quinoa Under Non-Saline and Saline Conditions

Hadis Hatami[1*]

1- National Salinity Research Center (NSRC), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Yazd, Iran
* Corresponding author, Email: h.hatami@areeo.ac.ir

(Received: 14 May 2024; Revised: 6 July 2024; Accepted: 7 July 2024)

Abstract

The objective of this study was to compare the effect of municipal sewage sludge (MSS) and triple superphosphate (TSP) application on some growth traits and P uptake of quinoa under saline and non-saline conditions. Therefore, a pot experiment was conducted in a completely randomized factorial design with 3 TSP levels (0, 29 and 38 mg kg^{-1} soil, named as T_0, T_1 and T_2, respectively), 3 MSS levels (0, 0.25 and 0.5 %w/w, named as M_0, M_1 and M_2, respectively), 2 irrigation water salinity levels (2 and 12 dS m^{-1}, named as non-saline and saline, respectively) and 3 replicates. The results showed that, although all the growth traits of quinoa significantly decreased by increasing of irrigation water salinity, application of MSS and TSP (especially combined treatments) was able to diminish the negative effect of salinity. In the non-saline condition, the highest amounts of shoot dry weight, seed yield and P uptake were observed for T_2M_2, which were 2.8, 3.1 and 13.7 times more than T_0M_0, respectively. In the saline condition, although T_2M_2 had the greatest enhancement in all the measured traits, there was no statistically difference between this treatment and T_1M_2. This result suggested that application of T_1M_2 in the saline condition was more convenient for improving the growth of quinoa as well as fertilizer management. The T_2M_2 and T_1M_2 were the best treatments in the non-saline and saline conditions, respectively, probably due to improvement of P uptake by quinoa as well as increase of soil organic matter content.

Keywords: Soil organic carbon, Pseudo-cereal, Salinity, Seed yield.

Background and Objective: Due to the P reactions with soil components, all of the P applied to soils is not available to plants, hence, it is necessary to improve P use efficiency. Application of organic compound (e.g., municipal sewage sludge) as a P fertilizer into soil is one of the ways to enhance soil P supply. The P availability issue is much more important in saline lands because in addition to soil components, salinity directly affects nutrient uptake and translocation (Bouras et al., 2022). Therefore, this study was conducted to compare the effect of the individual and combined applications of municipal sewage sludge (MSS) and triple superphosphate (TSP) on some growth traits and P uptake of quinoa under non-saline and saline conditions.

Materials and Methods: A pot experiment was laid in a completely randomized factorial design with 3 MSS levels (0, 0.25 and 0.5 %w/w, named as M_0, M_1 and M_2, respectively), 3 TSP levels (0, 29 and 38 mg kg^{-1} soil, named as T_0, T_1 and T_2, respectively), 2 irrigation water salinity levels (2 and 12 dS m^{-1}, named as non-saline and saline, respectively) and 3 replicates. Three months after planting, the plants were harvested for recording plant height, stem diameter and panicle length. The shoots were oven-dried at 70°C and the shoot dry weight, 1000-seed weight and seed yield were measured. Additionally, the shoot dry was crushed, ashed at 450°C and extracted by 0.1 M HCl solution to determine

Copyright © 2025 Isfahan University of Technology, Published by IUT Press. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

the content of P by molybdate method (Murphy and Riley, 1962). Furthermore, soil within the pots was air-dried, crushed gently and analyzed for the determination of electrical conductivity (EC) and soil organic carbon content. Statistical analyses were performed with MSTATC 1.42 and the means were compared by Duncan's test at $p < 0.05$.

Results: The results showed that all of the studied traits of quinoa in the saline condition were significantly lower than the non-saline condition. In other words, salinity had a negative effect on the growth of quinoa. However, application of MSS and TSP (especially the combined treatments) could improve the growth traits of quinoa. In the non-saline condition, the maximum values of shoot dry weight, 1000-seed weight and seed yield were found in T_2M_2, which were 2.8, 1.2 and 3.1 times higher than that of the T_0M_0 treatment, respectively. Likeness, the higher shoot P uptake (86.9 mg pot^{-1}) was observed in the T_2M_2 treatment. Nevertheless, T_1M_2 was the best treatment in the saline condition as there was no significant difference between the studied traits in this treatment and T_2M_2. Furthermore, the non-significant effect of MSS on soil EC and its positive effect on soil organic carbon content were other advantageous aspects of this compound.

Conclusions: The effectiveness of the treatments on the studied traits of quinoa were as follows: individual application of TSP < individual application of MSS < combined application of TSP and MSS. Therefore, the results suggested that the use of organic resources with mineral P fertilizer can minimize the adverse effects of salinity and improve the growth and yield of quinoa.

References:

1. Bouras, H., Choukr-Allah, R., Amouaouch, Y., Bouaziz, A., Devkota, K.P., El Mouttaqi, A., Bouazzama, B., Hirich, A., 2022. How does quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) respond to phosphorus fertilization and irrigation water salinity? Plants 11 (2), 216. https://doi.org/10.3390/plants11020216.
2. Murphy, J.A.M.E.S., Riley, J.P., 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. Anal. Chim. Acta. 27, 31–36. https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)88444-5.

How to Cite: Hatami, H., 2024. Influence of municipal sewage sludge and triple superphosphate application on some growth traits and P uptake of quinoa under non-saline and saline conditions. J. Soil Plant Interact. 15(3), 1–16 (In Persian). https://doi.org/10.47176/jspi.15.3.20121

روابط خاک و گیاه ۱۴۰۳؛ (۳)۱۵: ۱۶-۱، https://doi.org/10.47176/jspi.15.3.20121

روابط خاک و گیاه

صفحه خانگی فصلنامه: https://jspi.iut.ac.ir/

شاپا: ۵۰۱۴-۲۷۸۳ شاپا الکترونیکی: ۵۲۸۶-۲۷۸۳

مقاله پژوهشی

تأثیر کاربرد لجن فاضلاب شهری و سوپرفسفات تریپل بر برخی ویژگی‌های رشدی و جذب فسفر کینوا در شرایط غیرشور و شور

حدیث حاتمی*

مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: h.hatami@areeo.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۲/۲۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۴/۱۶، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۴/۱۷)

چکیده

هدف پژوهش حاضر بررسی تأثیر کاربرد جداگانه و توأم دو منبع آلی و معدنی فسفر بر ویژگی‌های رشدی، عملکرد و جذب فسفر گیاه کینوا در شرایط غیرشور و شور بود. بدین منظور، پژوهشی گلدانی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی شامل ۳ سطح لجن فاضلاب شهری (صفر، ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد وزنی به‌ترتیب M_0، M_1 و M_2)، ۳ سطح سوپر فسفات تریپل (صفر، ۲۹ و ۳۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک به‌ترتیب T_0، T_1 و T_2)، و ۲ سطح شوری آب آبیاری (۲ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر) با ۳ تکرار انجام شد. نتایج نشان داد که افزایش شوری منجر به کاهش معنی‌دار تمام ویژگی‌های رشدی، عملکرد و جذب فسفر در گیاه کینوا در مقایسه با شرایط غیرشور شد اما افزودن تیمارها به‌ویژه کاربرد توأم دو منبع کودی تا حدی آثار منفی شوری را تعدیل کرد. در شرایط غیرشور، تیمار T_2M_2 بیش‌ترین تأثیر را در بهبود وزن خشک شاخساره، وزن هزاردانه، عملکرد دانه و جذب فسفر داشت به‌گونه‌ای‌که این صفات را به‌ترتیب ۲/۸، ۱/۵، ۳/۱ و ۱۳/۷ برابر در مقایسه با شاهد افزایش داد. در شرایط شور، اگرچه بیش‌ترین مقدار ویژگی‌های مورد بررسی در تیمار T_2M_2 مشاهده شد اما با توجه به نبود تفاوت معنی‌دار بین این تیمار و T_1M_2 از یک‌سو و لزوم مدیریت صحیح مصرف کود از سویی دیگر، کاربرد تیمار T_1M_2 توصیه می‌شود. افزایش جذب فسفر در تیمارهای T_2M_2 و T_1M_2 و بهبود ماده آلی خاک از دلایل برتری این تیمارها در افزایش ویژگی‌های رشدی گیاه کینوا بود.

واژه‌های کلیدی: شبه‌غله، شوری، عملکرد دانه، کربن آلی خاک.

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. ۱۴۰۴ ©.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است:

Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

مقدمه

گیاه کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd) به‌عنوان یک شبه-غله در چند سال اخیر به‌دلیل غنی‌بودن از پروتئین، مواد معدنی (آهن، مس، فسفر، روی و منیزیم)، فیبر، انواع ویتامین‌ها و همچنین نداشتن گلوتن (Maleki et al., 2019) توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. علاوه‌بر این، در منابع از آن به‌عنوان گیاهی مقاوم در برابر تنش‌های محیطی (شوری، رطوبتی و دما) یاد شده است (Bouras et al., 2022). اگرچه گیاه کینوا به‌عنوان یک گیاه مقاوم به شوری در نظر گرفته می‌شود اما نتایج پژوهش‌ها نشان داده است که با افزایش شوری به‌ویژه شوری‌های بیش‌تر از حد آستانه گیاه (بین ۴/۳ تا ۸/۷ دسی‌زیمنس بر متر در عصاره اشباع خاک بسته به نوع ژنوتیپ و رقم، Salehi and Dehghany, 2024)، عملکرد این گیاه کاهش می‌یابد (Jamali and Sharifan 2018; Khalili et al., 2019). یکی از مهم‌ترین راهبردهای کاهش آثار منفی شوری در گیاهان، مدیریت صحیح کودی است؛ به عبارت دیگر بسته به شدت تنش می‌توان با در اختیار قرار دادن عناصر غذایی محدودکننده، تحمل گیاه به شوری را افزایش داد (Bouras et al., 2022). به‌طور کلی در شرایط تنش شوری، فراهمی فسفر در خاک به‌دلیل کاهش حلالیت کانی‌های تأمین‌کننده فسفر (Ca-P) و همچنین کاهش فعالیت یون‌های اورتوفسفات کاسته می‌شود (Wagdi et al., 2013) بنابراین، این عنصر به‌عنوان یکی از عناصر غذایی محدودکننده رشد گیاه در شرایط شور محسوب می‌شود. نتایج یک پژوهش مزرعه‌ای نشان داد که اگرچه وزن خشک شاخساره و عمکلرد دانه کینوا با افزایش شوری آب آبیاری (از ۵ تا ۱۷ دسی‌زیمنس بر متر) کاهش یافت اما افزودن فسفر به‌ویژه در سطح ۶۰ کیلوگرم P_2O_5 در هکتار سبب کاهش آثار منفی شوری و افزایش ۱۶ و ۱۳ درصدی عملکرد دانه به‌ترتیب در شوری‌های ۱۲ و ۱۷ دسی‌زیمنس بر متر در مقایسه با تیمار شاهد شد (Bouras et al., 2022). در پژوهش دیگری اثر سطوح مختلف شوری و سوپرفسفات تریپل بر ویژگی‌های گیاه کینوا مورد بررسی قرار گرفت و عنوان گردید که افزودن کود فسفر تا سطح ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار به‌ترتیب موجب افزایش ۱۲/۳ و ۱۲/۵ درصدی ارتفاع بوته و غلظت فسفر در شاخساره گیاه شد (Khalili et al., 2019).

کودهای فسفر پس از کاربرد در خاک‌های آهکی، به‌دلیل واکنش با کاتیون‌های خاک به‌ویژه کلسیم به‌سرعت به ترکیبات نامحلول و یا کم‌محلول تبدیل می‌شوند و تنها ۱۵ تا ۲۵ درصد از کود فسفره مصرف‌شده در زمان کوتاهی پس از کاربرد آن، به‌صورت قابل دسترس برای گیاه باقی خواهد ماند (Ardalan and Savaghebi Firouz Abadi, 2002). بنابراین افزایش مقدار زیادی از این عنصر لازم است تا فراهمی آن در خاک به حد مناسب برای رشد گیاه برسد که این امر خود منجر به بروز مشکلاتی مانند مسمومیت فسفری و کاهش فعالیت مایکوریزایی می‌شود (Sharpley, 1995). علاوه‌بر این، منابع فسفردار به‌عنوان منابع غیرقابل‌تجدید محسوب شده و همواره نگرانی‌هایی درباره اتمام آن‌ها وجود دارد (Yu et al., 2015). از این‌رو هم از نظر اقتصادی و هم از نظر اکولوژیک ارائه راه‌کارهایی به‌منظور افزایش و بهبود کارایی استفاده از فسفر ضروری به‌نظر می‌رسد. در این راستا پتانسیل تأمین فسفر از ترکیبات آلی از جمله لجن فاضلاب شهری برای مدیریت پایدار فسفر در محیط‌های کشاورزی مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است زیرا صرف‌نظر از تجدیدپذیری، دارای ویژگی‌هایی مانند غنی‌بودن از فسفر (۰/۱ درصد تا بیش از ۱۴ درصد بسته به نوع و ماهیت لجن خام تصفیه‌شده و فرآیند تهیه آن، McLaughlin et al., 1984)، قیمت کم‌تر در مقایسه با کودهای شیمیایی و بهبوددهندگی کیفیت خاک است (Jalali et al., 2021; Rehman et al., 2021). در پژوهش‌های مختلف اثر مثبت لجن فاضلاب شهری در افزایش فسفر قابل دسترس خاک (Vaseghi et al., 2005; Hejazi Mehrizi et al., 2013; Frišták and Soja, 2015) و بهبود ویژگی‌های رشدی گیاهانی مانند گندم (Shahbazi et al., 2018)، چغندرقند (Franco et al., 2010) ذرت (Shahbazi et al., 2019) و آفتاب‌گردان (Rasouli Sadaghiani and Sepehr, 2011; Najafi

and Mardomi, 2012) گزارش شده است. در مورد گیاه کینوا نیز نتایج یک پژوهش نشان داده است که کاربرد لجن فاضلاب می‌تواند با بهبود شرایط تغذیه‌ای، سبب افزایش رشد این گیاه شود (Afzalinejad et al., 2021). در پژوهش مذکور اگرچه مقدار رسانایی الکتریکی اولیه عصاره اشباع خاک (EC_e) نسبتاً زیاد بوده است (۱۳/۰۹ دسی‌زیمنس بر متر) اما آبیاری گیاه در مراحل رشد با آب مقطر انجام شده و گیاه در ابتدای مرحله گلدهی برداشت شده است. درحالی‌که به نظر می‌رسد بررسیگیاه کینوا پس از تکمیل چرخه رشدی آن و در شرایط آبیاری با آب شور احتمالاً نتایج نزدیک‌تر به واقعیتی را فراهم خواهد ساخت. بنابراین، پژوهش حاضر به‌منظور بررسی تأثیر کاربرد جداگانه و توأم لجن فاضلاب شهری و کود شیمیایی سوپرفسفات تریپل به‌عنوان دو منبع آلی و معدنی فسفر بر ویژگی‌های رشدی، عملکرد گیاه کینوا و جذب فسفر توسط شاخساره گیاه در شرایط غیرشور و شور اجرا شد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش به‌منظور بررسی تأثیر لجن فاضلاب شهری و سوپرفسفات تریپل بر ویژگی‌های رشدی، عملکرد و جذب فسفر در شاخساره گیاه کینوا، مطالعه‌ای گلدانی به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. تیمارهای آزمایشی شامل لجن فاضلاب شهری در سه سطح صفر، ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد وزنی به‌ترتیب M0، M_1 و M_2، کود سوپرفسفات تریپل در سه سطح صفر، ۲۹ (معادل ۷۵ کیلوگرم در هکتار) و ۳۸ (۱۰۰ کیلوگرم در هکتار) میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک، به‌ترتیب T_0، T_1 و T_2 و شوری آب آبیاری در دو سطح ۲ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر بودند. بنابراین، با احتساب ۳ تکرار تعداد کل گلدان‌ها برابر ۵۴ عدد بود.

خاک مورد استفاده در این پژوهش از یکی از زمین‌های کشت‌نشده مرکز ملی تحقیقات شوری و از لایه ۳۰-۰ سانتی‌متری تهیه شده و پس از هوا خشک‌شدن از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد بررسی به روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شد که در جدول (۱) ارائه شده است. لجن فاضلاب شهری نیز به‌صورتخشک از تصفیه‌خانه فاضلاب شهری یزد تهیه شده و از الک ۱ میلی‌متری عبور داده شد. برخی از ویژگی‌های لجن فاضلاب شهری و حد استاندارد گزارش شده برای عناصر سرب و کادمیم در جدول (۲) نشان داده شده است. پس از آماده‌سازی خاک و لجن فاضلاب شهری، سطوح مورد نظر از هر یک از منابع کاربردی با ۱۰ کیلوگرم خاک خشک مخلوط شده و به درون گلدان‌های پلاستیکی منتقل شد. برای آبیاری گلدان‌ها از آب با شوری ۲ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر استفاده شد که این آب‌ها از اختلاط آب شهری و آب انتقال‌یافته از خارج محل آزمایش با شوری بسیار زیاد تهیه گردید. برخی از ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شده آب آبیاری مورد استفاده در جدول (۳) ارائه شده است.

پیش از کاشت گیاه کینوا، گلدان‌ها چندین بار توسط آب با شوری‌های مورد نظر (۲ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر) به‌گونه‌ای آبیاری شدند تا شوری خاک به شوری آب آبیاری نزدیک شود. در ادامه و در طول فصل رشد نیز آبیاری با هدف کنترل شوری خاک تا ۱/۵ برابر شوری آب آبیاری برنامه‌ریزی شد. برای این منظور در هر آبیاری کسر آب‌شویی (LF) برابر ۱۵ درصد به‌کار برده شد. برای تعیین حجم آب مورد نیاز، ابتدا حجم آب مصرفی برای اشباع‌نمودن خاک و تامین ۱۵ درصد آب‌شویی در گلدان‌های بدون گیاه محاسبه شد. در ادامه و در طول فصل رشد، این حجم آب با دور آبیاری متغیر (از ۲ تا ۶ روز) به‌گونه‌ای در اختیار گیاه قرار داده شد تا از وقوع هرگونه تنش خشکی جلوگیری شود. برای اطمینان از وقوع آب‌شویی مدنظر، پس از هر سه نوبت آبیاری حجم زه‌آب اندازه‌گیری شد و در صورتی‌که آب‌شویی کم‌تر از ۱۵ درصد بود دور آبیاری کاهش داده می‌شد. در مجموع حجم آب کاربردی در طول فصل رشد برابر ۶۵۰۰ مترمکعب در هکتار بود.

در تاریخ ۲۴ مهر ۱۴۰۱ تعداد ۱۵ عدد بذر گیاه کینوا (رقم تیتیکاکا) در هر گلدان در عمق ۲ سانتی‌متری کشت شد و پس

جدول ۱. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد بررسی

Table 1. Selected physical and chemical properties of the studied soil

ویژگی Property	واحد Unit	روش‌های اندازه‌گیری و منابع مربوطه Measurement methods and their references	مقدار Value
pH_e		Electrometric	7.2
رسانایی الکتریکی عصاره اشباع Electrical conductivity of saturated extract, EC_e	$dS\ m^{-1}$	Platinum Electrode	14.0
شن Sand	%	Hydrometry (Gee and Bauder, 1986)	68.7
سیلت Silt	%	Hydrometry (Gee and Bauder, 1986)	14.0
رس Clay	%	Hydrometry (Gee and Bauder, 1986)	17.3
کربنات کلسیم معادل Calcium carbonate equivalent	%	Titrimetric (Allison and Moodie, 1965)	32
کربن آلی Organic carbon	%	Titrimetric (Walkley and Black, 1934)	0.08
نیتروژن کل Total nitrogen	$mg\ kg^{-1}$	Kjeldahl (Bremner, 1996)	70
پتاسیم قابل دسترس Available potassium	$mg\ kg^{-1}$	Ammonium acetate (Knudsen and Peterson, 1982)	172
فسفر قابل دسترس Available phosphorus	$mg\ kg^{-1}$	Olsen (Olsen and Sommer, 1982)	4.2

جدول ۲. برخی از ویژگی‌های شیمیایی لجن فاضلاب شهری کاربردی

Table 2. Selected chemical properties of the municipal sewage sludge used

ویژگی Property	واحد Unit	روش‌های اندازه‌گیری و منابع مربوطه Measurement methods and their references	مقدار Value	حد مجاز فلزات سنگین در لجن فاضلاب (USEPA, 1995) Maximum permitted content of heavy metals in sewage sludge (USEPA, 1995)
pH (1:10)		Electrometric	6.4	
EC (1:10)	$dS\ m^{-1}$	Platinum Electrode	4.1	
کربن آلی Organic carbon	%	Titrimetric (Walkley and Black, 1934)	39.9	
نیتروژن کل Total nitrogen	$g\ kg^{-1}$	Kjeldahl (Bremner, 1996)	60	
پتاسیم کل Total potassium	$g\ kg^{-1}$	Dry ash (AOAC, 2005)	6	
فسفر کل Total phosphorus	$g\ kg^{-1}$	Wet ash (AOAC, 2005)	24	
کادمیم کل Total cadmium	$mg\ kg^{-1}$	Aqua regia (Amacher, 1996)	nd*	34
سرب کل Total lead	$mg\ kg^{-1}$	Aqua regia (Amacher, 1996)	38.6	300

*: Not-detected

جدول ۳. برخی از ویژگی‌های شیمیایی آب آبیاری

Table 3. Selected chemical properties of the irrigation water

SAR	SO_4^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	Na^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	pH	EC
	meq L^{-1}							dS m^{-1}
6.5	1.2	1.1	27.9	16.8	4.3	9.1	8.0	2
13.7	4.1	2.9	111.0	70.0	17.0	35.0	7.9	12

از رسیدن به مرحله چهاربرگی، تعداد بوته‌ها در هر گلدان بـه ۴ عـدد رسانده شد. برای تیمار سطح شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر به‌منظـور اطمینان از استقرار گیاه؛ آبیاری تا مرحله جوانه‌زنی با آب با شـوری ۶ دسی‌زیمنس بر متر انجام شد و پس از آن، شوری مـورد نظـر اعمـال گردید. با توجه به مقادیر کـم غلظـت پتاسـیم و نیتـروژن در تجزیـه خاک (جدول ۱) مقدار ۵۸ میلی‌گرم بـر کیلـوگرم کـود اوره (در سـه قسط: پس از سبزشدن، مرحله غنچه‌دهی و مرحلـه گـرده‌افشـانی) و ۵۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود سولفات پتاسیم پیش از کاشـت اسـتفاده شد. علاوه‌بر این، مقادیر ۱۰۰ و ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم بـه‌ترتیـب از کودهای سولفات آهن و سولفات روی به‌منظور تأمین عناصر آهـن و روی پیش از کاشت به خاک افزوده شد.

سه ماه پس از کاشت و با تکمیل‌شدن مراحل رشد رویشـی و زایشی، گیاهان کف‌بر شدند و پس از اندازه‌گیری ارتفاع بوته، قطر ساقه و طول پانیکول، به مدت ۳ روز در آون در دمـای ۷۰ درجه سلسیوس قرار داده شدند. پس از خشک‌شدن نمونـه‌هـا، ویژگی‌های وزن خشک شاخسـاره، عملکـرد دانـه و وزن هـزار دانه اندازه‌گیری شـد. غلظـت فسـفر در خاکسـتر تهیـه‌شـده از شاخساره گیاهان به‌روش رنگ‌سـنجی (Murphy J and Riley, 1962) پس از هضم در اسید کلریدریک ۲ نرمال قرائت شد. در نمونه‌های خاک پس از برداشت، EC و درصد کربن آلی اندازه‌گیری شد. پردازش داده‌ها و رسـم نمودارهـا بـه وسـیله نـرم‌افزارهای MSTAT-C و Excel و مقایسـه میـانگین‌هـا بـه‌روش آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس ویژگی‌های مـورد بررسـی در گیـاه کینـوا تحت تأثیر تیمارهای مختلـف در جـدول (۴) نشـان داده شـده است. آثار اصلی تیمارهای آزمایشی بـرای تمـام صـفات مـورد بررسی (به جزء اثر سوپرفسفات تریپل بر طول پـانیکول و وزن هزار دانه) معنی‌دار بود اما معنی‌داری در مورد آثـار بـرهمکنش بسته به صفت مورد نظر متفاوت بود. به‌طور کلی به نظـر مـی‌رسد که تغییر شوری آب آبیاری و افزودن لجن فاضلاب شهری و سوپرفسفات تریپل بر عملکرد و جذب فسـفر در گیـاه کینـوا اثرگذار بوده است که در ادامه نتایج مربـوط بـه رونـد تغییـرات آثار برهمکنش سه‌گانه تیمارهای آزمایشـی مـورد بررسـی قـرار خواهد گرفت.

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد کـه در هـر دو سـطح شوری، افزودن کود سوپرفسفات تریپل و لجن فاضلاب شهری سبب افزایش معنی‌دار ارتفاع بوته و قطـر سـاقه گیـاه کینـوا در مقایسه با تیمار شاهد شد اما مقادیر این صفات در شرایط شـور به‌صـورت معنـی‌داری کـم‌تـر از تیمارهـای هـم‌ارز در شـرایط غیرشور بود (جدول ۵). بیش‌تـرین ارتفـاع بوتـه بـه‌ترتیـب در شوری‌های ۲ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر بـه مقـدار ۸۳/۹ و ۴۱/۷ سانتی‌متر در تیمارهای T_2M_2 و T_1M_2 و بیش‌تـرین قطـر سـاقه به‌ترتیب در شوری‌های ۲ و ۱۲ دسی‌زیمـنس بـه مقـدار ۶/۴ و ۴/۲ میلی‌متر در تیمار T_2M_2 مشاهده شد. بین مقادیر ارتفاع بوته در تیمارهای T_2M_2 و T_1M_2 در شرایط شور تفاوت معنـی‌داری وجود نداشت. در شرایط غیرشور روند تغییرات طـول پـانیکول در تیمارهای آزمایشی مشابه با ویژگی‌های ارتفـاع بوتـه و قطـر ساقه بود به‌گونه‌ای‌که بلندترین طول پانیکول (۱۷/۲ سانتی‌متـر) به تیمار T_2M_2 تعلق داشت (جدول ۵). با افزایش شوری، هیچ‌یـک از تیمارهـای آزمایشـی قـادر بـه افـزایش معنـی‌دار طـول

جدول ۴. تجزیه واریانس برخی صفات رشدی، عملکرد و جذب فسفر در شاخساره گیاه کینوا

Table 4. Analysis of variance for some growth traits, yield and P uptake of quinoa

منابع تغییر Sources of variation	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربعات Mean of squares						
		ارتفاع بوته Plant height	قطر ساقه Stem diameter	طول پانیکول Panicle length	وزن خشک شاخساره Shoot dry weight	وزن هزار دانه 1000-seed weight	عملکرد دانه Seed yield	جذب فسفر در شاخساره Shoot P uptake
شوری (Salinity)	1	13994.1**	40.2**	691.8**	2976.3**	2.3**	414.4**	5143.1**
لجن فاضلاب (Sewage sludge)	2	1253.5**	3.2**	15.8**	627.2**	0.4**	125.1**	7253.4**
سوپرفسفات تریپل (Triple superphosphate)	2	223.3*	1.5*	11.6	110.9**	0.1	45.6**	1839.6**
شوری × لجن فاضلاب (Salinity × Sewage sludge)	2	258.7*	1.2*	7.6*	150.2**	0.0	16.6**	867.4**
شوری × سوپرفسفات تریپل (Salinity × Triple superphosphate)	2	52	0.9	6.8	28.7*	0.0	2.5*	235.3*
لجن فاضلاب × سوپرفسفات تریپل (Sewage sludge × Triple superphosphate)	4	34.2	0.2	0.8	6.9*	0.0	1.6	326.8*
شوری × لجن فاضلاب × سوپرفسفات تریپل (Salinity × Sewage sludge × Triple superphosphate)	4	38.1	0.2	0.3	2.9	0.0	2.7**	15.3
خطا (Error)	36	59.1	0.3	2.4	1.3	0.0	0.6	65.7
ضریب تغییرات (٪) (Coefficient of variation)		14.5	11.9	13.9	5.7	7.8	7.3	28.3

* و ** به‌ترتیب بیان‌گر اثر معنی‌دار در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد است.

* and ** stand for significant effects at 5 and 1% probability levels, respectively.

پانیکول در مقایسه با تیمار شاهد نشدند (جدول ۵). کاهش ارتفاع بوته، قطر ساقه و طول پانیکول کینوا با افزایش شوری در دیگر پژوهش‌ها نیز گزارش شده است (Khalili et al., 2019; Beyrami et al., 2020).

به‌طور مشابه بیش‌ترین وزن هزار دانه در شرایط غیرشور (۳/۱ گرم) و شور (۲/۷ گرم) در تیمار T_2M_2 مشاهده شد (جدول ۵) اما در شرایط شور بین این تیمار و تیمار T_1M_2 تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. علاوه بر این، اگرچه افزایش شوری سبب

جدول ۵. مقایسه میانگین اثر برهمکنش سطوح مختلف لجن فاضلاب شهری، سوپرفسفات تریپل و شوری بر برخی صفات رشدی گیاه کینوا

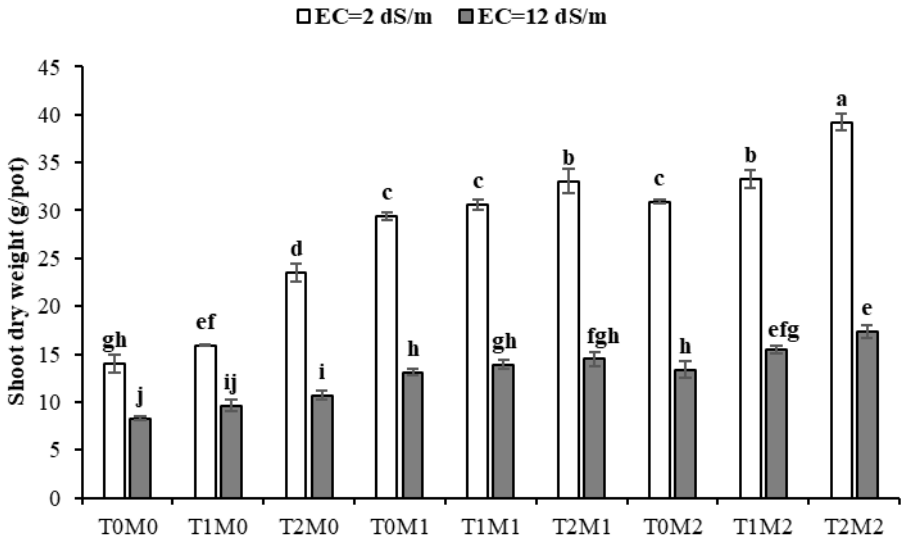
Table 5. Mean comparisons of the interaction effect of different levels of municipal sewage sludge, triple superphosphate and salinity on some growth traits of quinoa

وزن هزاردانه 1000-seed weight (g)	طول پانیکول Panicle length (cm)	قطر ساقه Stem diameter (mm)	ارتفاع بوته Plant height (cm)	سطوح مختلف سوپرفسفات تریپل و لجن فاضلاب شهری Different levels of municipal sewage sludge and triple superphosphate	شوری Salinity ($dS\ m^{-1}$)
2.1 klm	10.4 c	3.8 d	47.6 ef	T_0M_0	2
2.3 ij	14.0 b	5.2 c	57.2 de	T_1M_0	
2.4 ghi	14.8 ab	5.6 abc	61.2 cd	T_2M_0	
2.6 defg	14.3 b	5.4 bc	73.9 ab	T_0M_1	
2.7 bcd	15.8 ab	5.9 abc	78.4 ab	T_1M_1	
2.8 bc	15.6 ab	5.9 abc	79.4 ab	T_2M_1	
2.7 cde	15.0 ab	5.9 abc	72.7 abc	T_0M_2	
2.9 b	16.4 ab	6.2 ab	69.3 bcd	T_1M_2	
3.1 a	17.2 a	6.4 a	83.9 a	T_2M_2	
1.9 m	7.3 d	3.6 d	27.1 h	T_0M_0	12
2.0 lm	7.4 d	3.8 d	32.7 gh	T_1M_0	
2.2 jkl	7.4 d	3.7 d	35.7 fgh	T_2M_0	
2.2 jk	7.4 d	3.9 d	38.8 fgh	T_0M_1	
2.5 fgh	7.9 cd	3.8 d	39.0 fgh	T_1M_1	
2.5 efgh	7.8 d	4.0 d	41.2 fg	T_2M_1	
2.4 hij	7.6 d	3.9 d	38.4 fgh	T_0M_2	
2.6 def	8.2 cd	4.0 d	41.7 fg	T_1M_2	
2.7 cde	8.0 cd	4.2 d	39.3 fgh	T_2M_2	

در هر ستون، میانگین‌های با حداقل یک حرف مشترک بر اساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن دارای اختلاف معنی‌دار ($p < 0.05$) نمی‌باشند. T_0، T_1 و T_2 به‌ترتیب سطوح صفر، ۲۹ و ۳۸ میلی‌گرم سوپرفسفات تریپل بر کیلوگرم خاک و M_0، M_1 و M_2 به‌ترتیب سطوح صفر، ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد وزنی لجن فاضلاب شهری هستند.

In each column, means followed by at least one similar letter are not significantly different (Duncan, $p < 0.05$). T_0, T1, T_2 are 0, 29 and 38 mg kg^{-1} triple superphosphate and M_0, M1, M_2 are 0, 0.25, 0.5 %w/w municipal sewage sludge, respectively.

کاهش معنی‌دار وزن هزار دانه در مقایسه با تیمارهای هم‌ارز در شرایط غیرشور شد اما کاربرد تیمارهای آزمایشی به‌ویژه افزودن توأم لجن فاضلاب شهری و سوپرفسفات تریپل توانست تا حدی آثار منفی شوری را کاهش دهد به‌گونه‌ای‌که وزن هزار دانه در تیمار T_2M_2 در شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر، تنها از تیمارهای T_1M_2 و T_2M_2 مربوط به شوری ۲ دسی‌زیمنس بر متر به‌صورت معنی‌داری کوچک‌تر بود و با سایر تیمارها تفاوت معنی‌داری نشان نداد. اثر سمّیت تجمع نمک و مختل‌شدن جذب عناصر غذایی در شرایط شور از جمله عوامل مؤثر بر کاهش توسعه و تکامل دانه گیاه کینوا با افزایش شوری محیط رشد عنوان شده است (Papan et al., 2020). با کاربرد تلفیقی کودهای آلی و شیمیایی به‌دلیل انتقال بیش‌تر مواد فتوسنتزی به

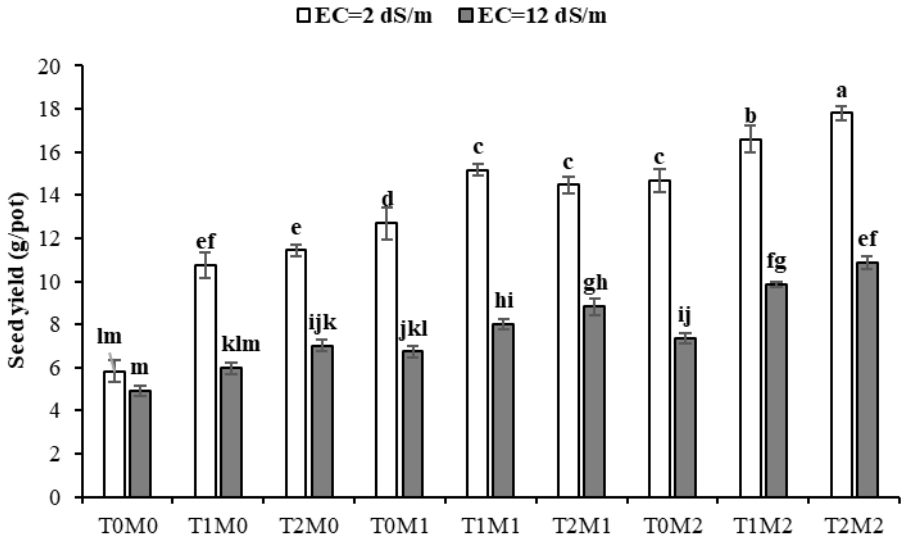


شکل ۱. وزن خشک شاخساره کینوا تحت تأثیر سطوح مختلف لجن فاضلاب شهری، سوپرفسفات تریپل و شوری؛ میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در سطح ۵ درصد آزمون چنددامنه‌ای دانکن دارای اختلاف معنی‌دار نمی‌باشند. T_0، T_1 و T_2 به‌ترتیب سطوح صفر، ۲۹ و ۳۸ میلی‌گرم سوپرفسفات تریپل در هر کیلوگرم خاک و M_0، M_1 و M_2 به‌ترتیب سطوح صفر، ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد وزنی لجن فاضلاب شهری هستند.

Fig. 1. Shoot dry weight of quinoa as affected by municipal sewage sludge, triple superphosphate and salinity; Bars with at least one similar letter are not significantly different (Duncan, $p < 0.05$). T_0, T1, T_2 are 0, 29 and 38 mg kg^{-1} triple superphosphate and M_0, M1, M_2 are 0, 0.25, 0.5 %w/w municipal sewage sludge, respectively.

دانه با افزایش سطح برگ گیاه و همچنین آزادسازی عناصر غذایی از کود آلی در مرحله پرشدن دانه، عملکرد گیاه در شرایط تنش شوری می‌تواند افزایش یابد (Iqbal et al., 2019). در پژوهشی که با هدف بررسی تأثیر کودهای شیمیایی و زیستی بر برخی صفات فیزیولوژیک و عملکردی گیاه کینوا انجام شد، گزارش شد که کاربرد توأم کودهای شیمیایی و زیستی بیش‌ترین تأثیر را بر افزایش عملکرد دانه و وزن هزار دانه داشته است (Amiryousefi et al., 2021).

همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، وزن خشک شاخساره در تمام تیمارهای مربوط به شوری آب آبیاری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر به‌صورت معنی‌داری کم‌تر از تیمارهای هم‌ارز آن در شوری ۲ دسی‌زیمنس بر متر بود. با افزودن لجن فاضلاب شهری و سوپرفسفات تریپل در هر دو شوری وزن خشک شاخساره افزایش یافت به‌گونه‌ای‌که بیش‌ترین مقدار وزن خشک در شوری‌های ۲ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر به‌ترتیب به مقدار ۳۹/۲ و ۱۷/۳ گرم بر گلدان در تیمار T_2M_2 مشاهده شد که در مقایسه با تیمار شاهد آن‌ها به‌ترتیب موجب افزایش ۲/۸ و ۲/۱ برابری این صفت گردید. مقادیر وزن خشک شاخساره در تیمارهای T_2M_2 و T_1M_2 در شرایط شور تفاوت معنی‌داری از نظر آماری نشان ندادند که این روند در مورد ویژگی‌های مورد بررسی پیشین نیز مشاهده شده بود. تأثیر مثبت کاربرد منابع آلی در افزایش عملکرد کینوا و دیگر گیاهان در تعدای از پژوهش‌ها گزارش شده است. به‌عنوان مثال Youssef and Farag (2021) اثر کاربرد کود دامی و کود زیستی را بر ویژگی‌های رشدی کینوا و حاصلخیزی خاک در مقایسه با کود غیرآلی (NPK) مورد بررسی قرار داده و بیان کردند که تمام صفات گیاهی مورد بررسی از جمله ارتفاع، وزن خشک، عملکرد دانه و غیره با کاربرد منابع آلی به‌ویژه با کاربرد همزمان کودهای دامی و زیستی در مقایسه با کود غیرآلی افزایش یافت. در پژوهش دیگری تأثیر کاربرد لجن فاضلاب و کود شیمیایی



شکل ۲. وزن دانه کینوا تحت تأثیر سطوح مختلف لجن فاضلاب شهری، سوپرفسفات تریپل و شوری؛ میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در سطح ۵ درصد آزمون چنددامنه‌ای دانکن دارای اختلاف معنی‌دار نمی‌باشند. T_0، T_1 و T_2 به‌ترتیب سطوح صفر، ۲۹ و ۳۸ میلی‌گرم سوپرفسفات تریپل در هر کیلوگرم خاک و M_0، M_1 و M_2 به‌ترتیب سطوح صفر، ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد وزنی لجن فاضلاب شهری هستند.

Fig. 2. Seed yield of quinoa as affected by municipal sewage sludge, triple superphosphate and salinity; Bars with at least one similar letter are not significantly different (Duncan, $p < 0.05$). T_0, T1, T_2 are 0, 29 and 38 mg kg^{-1} triple superphosphate and M_0, M1, M_2 are 0, 0.25, 0.5 %w/w municipal sewage sludge, respectively.

مونوفسفات پتاسیم بر شاخص‌های رشدی گیاه ذرت مورد ارزیابی قرار گرفت و عنوان شد که کاربرد توأم این منابع موجب افزایش ۳۲/۵ درصدی ماده خشک در مقایسه با کاربرد جداگانه لجن فاضلاب و ۱۷۰ درصدی آن در مقایسه با کاربرد جداگانه کود شیمیایی شد (Shahbazi et al., 2019). نتایج مشابه دیگری نیز برای گیاه گندم توسط Moeini et al. (2016) گزارش شده است.

مشابه با نتایج وزن خشک شاخساره، عملکرد دانه در تمام تیمارهای آزمایشی (به جزء T_0M_0) در شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر به‌صورت معنی‌داری کم‌تر از شوری ۲ دسی‌زیمنس بر متر بود (شکل ۲). تیمارهای T_0M_1، T_0M_2، T_1M_0 و T_2M_0 اگرچه عملکرد دانه تولیدی را در مقایسه با شاهد (T_0M_0) در هر دو شوری افزایش دادند اما میان عملکرد تیمارهای T_0M_1 و T_0M_2 و همچنین بین تیمارهای T_1M_0 و T_2M_0 تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. به عبارت دیگر با کاربرد جداگانه هر یک از منابع کودی، سطوح مختلف آن‌ها دارای سهم یکسانی در افزایش عملکرد بوده‌اند؛ درحالی‌که کاربرد توأم آن‌ها (T_1M_1، T_1M_2، T_2M_1 و T_2M_2) به‌ویژه در شوری ۲ دسی‌زیمنس بر متر، نتایج رضایت‌بخش‌تری در افزایش معنی‌دار عملکرد دانه نشان داد. تیمار T_2M_2 توانست بیش‌ترین عملکرد دانه را به مقدار ۱۷/۸ و ۱۰/۹ گرم بر گلدان به‌ترتیب در شوری‌های ۲ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر کسب نماید که در مقایسه با شاهد به‌ترتیب ۳/۱ و ۲/۲ برابر بیش‌تر بود. لازم به ذکر است در شرایط شور بین مقادیر عملکرد دانه در تیمارهای T_2M_2 و T_1M_2 تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. به‌طور کلی افزایش ماده آلی خاک، بهبود برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و تأمین مناسب عناصر غذایی از جمله دلایل تأثیر مثبت کاربرد توأم منابع آلی و شیمیایی گزارش شده است (Akhtar et al., 2002; Frišták and Soja, 2015; Bai et al., 2022; Achkir et al., 2023). در پژوهش حاضر نیز تغییرات کربن آلی خاک در تیمارهای لجن فاضلاب شهری دلالت بر تأثیر مثبت این ماده در افزایش کربن آلی خاک در مقایسه با تیمارهای شاهد و سوپر

جدول ۶. مقایسه میانگین اثر برهمکنش سطوح مختلف لجن فاضلاب شهری، سوپرفسفات تریپل و شوری بر کربن آلی و رسانایی الکتریکی عصاره اشباع (EC_e) خاک پس از برداشت

Table 6. Mean comparisons of the interaction effect of different levels of municipal sewage sludge, triple superphosphate and salinity on soil organic carbon and electrical conductivity of saturated extract (EC_e) after harvesting

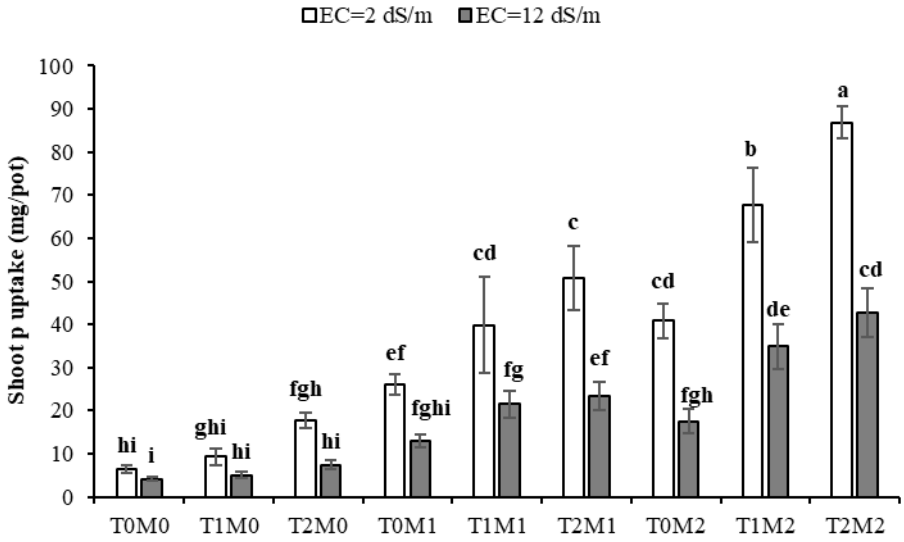
EC_e (dS m^{-1})	کربن آلی Organic carbon (%)	سطوح مختلف سوپرفسفات تریپل و لجن فاضلاب شهری Different levels of municipal sewage sludge sand triple superphosphate	شوری Salinity (dS m^{-1})
5.37 c	0.10 h	T_0M_0	2
5.13 c	0.10 h	T_1M_0	
5.43 c	0.13 gh	T_2M_0	
5.27 c	0.17 fg	T_0M_1	
5.17 c	0.20 ef	T_1M_1	
6.07 c	0.20 ef	T_2M_1	
5.60 c	0.23 de	T_0M_2	
5.27 c	0.20 ef	T_1M_2	
5.43 c	0.30 bc	T_2M_2	
29.60 a	0.20 ef	T_0M_0	12
29.13 a	0.20 ef	T_1M_0	
24.27 b	0.17 fg	T_2M_0	
28.53 ab	0.17 fg	T_0M_1	
29.53 a	0.20 ef	T_1M_1	
28.17 ab	0.27 cd	T_2M_1	
27.97 ab	0.33 b	T_0M_2	
27.83 ab	0.30 b	T_1M_2	
29.70 a	0.4 a	T_2M_2	

در هر ستون، میانگین‌های با حداقل یک حرف مشترک بر اساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن دارای اختلاف معنی‌دار (p<0.05) نمی‌باشند. T_0، T_1 و T_2 به‌ترتیب سطوح صفر، ۲۹ و ۳۸ میلی‌گرم سوپرفسفات تریپل در هر کیلوگرم خاک و M_0، M_1 و M_2 به‌ترتیب سطوح صفر، ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد وزنی لجن فاضلاب شهری هستند.

In each column, means followed by at least one similar letter are not significantly different (Duncan., p<0.05). T_0, T1, T_2 are 0, 29 and 38 mg kg^{-1} triple superphosphate and M_0, M1, M_2 are 0, 0.25, 0.5 %w/w municipal sewage sludge, respectively.

فسفات تریپل داشت که خود می‌تواند از دلایل افزایش وزن دانه در این تیمارها باشد (جدول ۶). علاوه بر این، توجه به درصد عناصر غذایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم در نمونه لجن فاضلاب شهری به‌کار رفته (جدول ۲) حاکی از مقدار زیاد این عناصر در این نمونه است که می‌تواند نقش مهمی در تأمین عناصر غذایی گیاه در طی رشد داشته باشد. در ادامه نتایج جذب فسفر در تیمارهای مختلف مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

بررسی نتایج EC در نمونه‌های خاک پس از برداشت نشان داد که کاربرد لجن فاضلاب شهری و کود سوپرفسفات تریپل، تأثیر قابل توجهی بر EC خاک در تیمارهای شوری نداشت (جدول ۶). تغییر اندک EC خاک در اثر افزودن لجن فاضلاب



شکل ۳. جذب فسفر در شاخساره کینوا تحت تأثیر سطوح مختلف لجن فاضلاب شهری، سوپرفسفات تریپل و شوری؛ میانگین‌های با حداقل یک حرف مشترک در سطح ۵ درصد آزمون چنددامنه‌ای دانکن دارای اختلاف معنی‌دار نمی‌باشند. T_0، T_1 و T_2 به‌ترتیب سطوح صفر، ۲۹ و ۳۸ میلی‌گرم سوپرفسفات تریپل در هر کیلوگرم خاک و M_0، M_1 و M_2 به‌ترتیب سطوح صفر، ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد وزنی لجن فاضلاب شهری هستند.

Fig. 3. The P uptake of quinoa as affected by municipal sewage sludge, triple superphosphate and salinity; Bars with at least one similar letter are not significantly different (Duncan, $p < 0.05$). T_0, T1, T_2 are 0, 29 and 38 mg kg^{-1} triple superphosphate and M_0, M1, M_2 are 0, 0.25, 0.5 %w/w municipal sewage sludge, respectively.

شهری، از پیامدهای مثبت این ترکیب محسوب می‌شود. با این‌حال و با وجود کنترل آب‌شویی در طول فصل رشد، رسانایی الکتریکی عصاره اشباع خاک در انتهای فصل رشد منطبق بر جزء آب‌شویی ۱۵ درصدی نبود و مقدار آن به‌طور میانگین در تیمارهای شوری ۲ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر به‌ترتیب برابر با ۵/۴ و ۲۸/۳ دسی‌زیمنس بر متر (نظیر جزء آبشویی ۱۰ درصد) بود (جدول ۶). به‌عبارت دیگر حداقل در بخش‌هایی از فصل رشد، ریشه گیاه با میزان شوری بیش‌تر از شوری آب آبیاری در تماس بوده است. همان‌طورکه پیش از این نیز اشاره شد حد آستانه تحمل به شوری در گیاه کینوا (رقم تیتکاکا) برابر با ۶/۸ دسی‌زیمنس بر متر در عصاره اشباع خاک گزارش شده است (Salehi and Dehghany, 2024) بنابراین، افزایش شوری خاک در تیمارهای تحت شوری آب ۲ دسی‌زیمنس بر متر محدودکننده نبوده است. در رابطه با شوری آب آبیاری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر نیز مقادیر رسانایی الکتریکی عصاره اشباع خاک بیش‌تر از ۲۵ دسی‌زیمنس بر متر در عصاره اشباع خاک متناظر با کاهش ۵۰ درصدی عملکرد گزارش شده است (Razzaghi et al., 2014). در این پژوهش نیز مقادیر عملکرد مشاهده‌شده در شرایط شور تقریباً به نصف مقادیر تیمارهای غیرشور رسید (شکل ۲).

نتایج مربوط به جذب فسفر در شاخساره گیاه کینوا در شکل (۳) نمایش داده شده است. روند افزایش جذب فسفر در هر دو شوری به‌صورت: کاربرد توأم دو منبع > کاربرد جداگانه لجن فاضلاب > کاربرد جداگانه سوپر فسفات تریپل > شاهد بود که این روند مشابه با نتایج ذکرشده در بخش‌های پیشین بود. مقادیر بیشینه جذب فسفر در تیمار T_2M_2 برابر ۸۶/۹ و ۴۲/۸ میلی‌گرم بر گلدان به‌ترتیب در شوری‌های ۲ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر به‌دست آمد که به‌ترتیب موجب افزایش ۱۳/۷ و ۱۰/۴ برابری جذب در این تیمارها در مقایسه با تیمار شاهد شده بود. لازم به ذکر است میزان جذب فسفر در دو تیمار T_1M_2 و T_2M_2 در شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر از نظر آماری تفاوت معنی‌داری نشان نداد که مشابه با دیگر ویژگی‌های مورد

بررسی در این پژوهش بود. این نتایج علاوه بر این‌که بیانگر اهمیت کاربرد توأم منابع آلی و معدنی فسفر در افزایش جذب این عنصر توسط گیاه کینوا است؛ نشان‌دهنده نقش اساسی عنصر فسفر در افزایش پارامترهای رشدی گیاه است زیرا همان‌طور که نتایج این پژوهش نشان داد، جذب بیش‌تر فسفر در تیمارها منجر به افزایش ارتفاع بوته، طول سنبله، وزن خشک شاخساره و عملکرد دانه در آن‌ها شده است.

در پژوهش‌های مختلف بیشینه عملکرد تولیدی برای گیاه کینوا در سطوح مختلفی از کود فسفر گزارش شده است. به‌عنوان مثال، در یک پژوهش تأثیر سطوح مختلف N (صفر، ۴۰، ۸۰ و ۱۲۰ کیلوگرم بر هکتار)، P_2O_5 (صفر، ۳۰ و ۶۰ کیلوگرم بر هکتار) و K_2O (صفر، ۶۰ و ۱۲۰ کیلوگرم بر هکتار) بر رشد و تولید کینوا مورد بررسی قرار گرفت و عنوان شد بیش‌ترین مقدار وزن خشک و عملکرد دانه در ترکیب کودی ۱۲۰-۶۰-۴۰ به‌دست آمد که میزان جذب فسفر در این تیمار معادل با ۲۷/۶ کیلوگرم P_2O_5 در هکتار بود (Taaime et al., 2023). در پژوهش دیگری بیشینه عملکرد تولیدی برای گیاه کینوا در سطح ۱۰۰ کیلوگرم سوپرفسفات تریپل در هکتار (برابر ۴۶ کیلوگرم P_2O_5 در هکتار) مشاهده شد (Khalili et al., 2019). به نظر می‌رسد که پاسخ گیاه کینوا به میزان کود مصرفی بسته به رقم، نوع خاک، شرایط اقلیمی و مدیریت زراعی متفاوت است.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی الگوی اثرگذاری تیمارها در بهبود صفات مورد بررسی در گیاه کینوا به‌صورت: کاربرد توأم دو منبع > کاربرد جداگانه لجن فاضلاب > کاربرد جداگانه سوپر فسفات تریپل > شاهد مشاهده شد. بر این اساس، کاربرد توأم منابع آلی و معدنی فسفر به‌دلیل جذب بیش‌تر فسفر در شاخساره گیاه کینوا و بهبود ماده آلی خاک می‌تواند تأثیر به‌سزایی در افزایش عملکرد این گیاه در شرایط شور و کاهش آثار منفی شوری داشته باشد. از میان سطوح مختلف به‌کار برده شده در این پژوهش، مصرف هم‌زمان ۲۹ میلی‌گرم در کیلوگرم سوپرفسفات تریپل و ۰/۵ درصد وزنی لجن فاضلاب شهری دارای بهترین پاسخگویی به افزایش عملکرد کینوا در شرایط شور بود. اگرچه غلظت عناصر سنگین مورد بررسی در نمونه لجن فاضلاب شهری به‌کار رفته در این پژوهش کم‌تر از حدود مجاز این عناصر بود اما با این وجود، به‌دلیل احتمال تغییر ترکیبات لجن فاضلاب شهری در طی زمان، انجام پژوهش‌های تکمیلی و مزرعه‌ای به‌منظور اطمینان از بی‌خطر یا کم‌خطر بودن این ترکیب پس از افزوده‌شدن به خاک ضروری بوده و پیشنهاد می‌شود.

تشکر و سپاسگزاری

بدین‌وسیله از مدیریت محترم مرکز ملی تحقیقات شوری استان یزد برای فراهم نمودن اعتبار و امکانات انجام این پژوهش، تشکر و قدردانی می‌گردد.

تضاد منافع

نویسنده مقاله اذعان دارد هیچ‌گونه تضاد منافعی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارد.

منابع مورد استفاده

References

1. Achkir, A., Aouragh, A., El Mahi, M., Labjar, N., Bouch, M.E., Ouahidi, M.L., Badza, T., Farhane, H., Moussaoui, T.E., 2023. Implication of sewage sludge increased application rates on soil fertility and heavy metals contamination risk. Emerg. Contam. 9(1), 100200. https://doi.org/10.1016/j.emcon.2022.100200.
2. Afzalinejad, F., Ghasemi, S., Seyfati, S.E., Shahbazi, Sh., 2021. The effect of sewage sludge on the growth and some nutrient elements of three quinoa genotypes in a calcareous and saline soil. J. Water Soil Sci. 24(4), 127–139. https://doi.org/10.47176/jwss.24.4.42021. (In Persian with English abstract)
3. Akhtar, M., McCallister, D.L., Eskridge, K.M., 2002. Availability and fractionation of phosphorus in sewage sludge-amended soils. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 33(13-14), 2057–2068. https://doi.org/10.1081/CSS-120005748.
4. Allison, L.E., Moodie, C.D., 1965. Carbonate. In: Black, C.A. (Ed.), Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical

Methods, American Society of Agronomy, Madison, WI, pp. 1379–1394.
5. Amacher, M.C., 1996. Nickel, cadmium, and lead. In: Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., Loeppert, R.H. (Eds.), Methods of Soil Analysis, Part 3. Chemical Methods, American Society of Agronomy, Madison, WI, pp. 1011–1069.
6. Amiryousefi, M., Tadayon, M., Ebrahimi, R., 2021. The effect of chemical and biological fertilizers on some physiological and yield traits of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) under drought stress in saline soil. J. Agroecol. 13(2), 251–270. https://doi.org/10.22067/JAG.V13I2.84128. (In Persian with English abstract)
7. Ardalan, M., Savaghebi Firouz Abadi, Gh., 2002. Soil Fertility Management for Sustainable Agriculture, First ed. Tehran University Press, Tehran. (In Persian)
8. Association of Official Analytical Chemists (AOAC), 2005. Official Method of Analysis, 18th ed. Maryland.
9. Bai, J., Sun, X., Xu, C., Ma, X., Huang, Y., Fan, Z., 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. https://doi.org/10.3390/f13070984.
10. Beyrami, H, Rahimian, M.H., Salehi, M., Yazdani-Biouki, R., 2020. Effect of different levels of irrigation water salinity on quinoa (*Chenopodium quinoa*) yield and yield components in spring planting. Crop Prod. 12(4), 111–120. https://doi.org/10.22069/EJCP.2020.16239.2209. (In Persian with English abstract)
11. Bouras, H., Choukr-Allah, R., Amouaouch, Y., Bouaziz, A., Devkota, K.P., El Mouttaqi, A., Bouazzama, B., Hirich, A., 2022. How does quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) respond to phosphorus fertilization and irrigation water salinity? Plants 11(2), 216. https://doi.org/10.3390/plants11020216.
12. Bremner, J.M., 1996. Nitrogen-total. In: Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., Loeppert, R.H. (Eds.), Methods of Soil Analysis, Part 3. Chemical Methods, American Society of Agronomy, Madison, WI, pp. 1085–1121.
13. Franco, A., Abreu Junior, C.H., Perecin, D., Oliveira, F.C., Granja, A.C.R., Braga, V.S., 2010. Sewage sludge as nitrogen and phosphorus source for cane-plant and first ratoon crops. Rev. Bras. Cienc. Solo. 34, 553–561. https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000200029.
14. Frišták, V., Soja, G., 2015. Effect of wood-based biochar and sewage sludge amendments for soil phosphorus availability. Nova Biotechnol. Chim. 14(1), 104–115. https://doi.org/10.1515/nbec-2015-0020.
15. Gee, G.W., Bauder, J.W., 1986. Particle-size analysis. In: Klute, A. (Ed.), Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods, American Society of Agronomy, Madison, WI, pp. 383–411.
16. Hejazi-Mehrizi, M., Shariatmadari, H., Afyuni, M., 2013. Cumulative and residual effect of sewage sludge on inorganic P fractions and P availability in a calcareous soil. J. Water Soil Sci. 17(64), 33–42. https://doi.org/20.1001.1.24763594.1392.17.64.12.2. (In Persian with English abstract)
17. Iqbal, A., He, L., Khan, A., Wei, S., Akhtar, K., Ali, I., Ullah, S., Munsif, F., Zhao, Q., Jiang, L., 2019. Organic manure coupled with inorganic fertilizer: An approach for the sustainable production of rice by improving soil properties and nitrogen use efficiency. J. Agron. 9(10), 651. https://doi.org/10.3390/agronomy9100651.
18. Jalali, M., Jalali, M., Antoniadis, V., 2021. Impact of sewage sludge, nanoparticles, and clay minerals addition on cucumber growth, phosphorus uptake, soil phosphorus status, and potential risk of phosphorus loss. Environ. Technol. Innov. 23, 101702. https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101702.
19. Jamali, S., Sharifan, H., 2018. Investigation the effect of different salinity levels on yield and yield components of quinoa (Cv. Titicaca). J. Water Soil Conserv. 25(2), 251–261. https://doi.org/10.22069/JWSC.2018.13721.2841. (In Persian with English abstract).
20. Khalili, S., Bastani, A., Bagheri, M., 2019. Effect of different levels of irrigation water salinity and phosphorus on some properties of soil and quinoa plant. J. Soil Res. 33(2), 155–166. https://doi.org/10.22092/IJSR.2019.119757. (In Persian with English abstract).
21. Maleki, P., Saadat, S., Bahrami, H.A., Rezaei, H., Esmaeelnejad, L., 2019. Accumulation of ions in shoot and seed of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) under salinity stress. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 50(6), 782–793. https://doi.org/ 10.1080/00103624.2019.1589486.
22. McLaughlin, M.J., 1984. Land application of sewage sludge: Phosphorus considerations. S. Afr. J. Plant Soil. 1(1), 21–29. https://doi.org/10.1080/02571862.1984.10634104.
23. Moeini, M., Hejazi Mehrizi, M., Jafari, A., 2016. Assessment of phosphorus status in a saline soil after sewage sludge and chemical P fertilizer application using a chemical fractionation procedure. J. Agric. Eng. 38(2), 125–144. https://doi.org/10.22055/agen.2016.11670. (In Persian with English abstract)
24. Murphy, J.A.M.E.S., Riley, J.P., 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. Anal. Chim. Acta, 27, 31–36. https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)88444-5.
25. Najafi, N., Mardomi, S., 2012. The effects of waterlogging, sewage sludge and manure on the growth characteristics of sunflower in a sandy loam soil. J. Water Soil. 25(6), 1264–1276. https://doi.org/10.22067/JSW.V0I0.12127. (In Persian with English abstract)
26. Olsen, S.R., Sommer, L.E., 1982. Phosphorus. In: Klute, A. (Ed.), Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and

Mineralogical Methods, American Society of Agronomy, Madison, WI, pp. 403–430.
27. Knudsen, D., Peterson, G.A., Pratt, P.F., 1982. Lithium, sodium, and potassium. In: Page, A.L., Miller R.H., Keeney, D.R. (Eds.), Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical Methods, American Society of Agronomy, Madison, WI, pp. 225–246.
28. Papan, P., Moezzi, A., Chorom, M., Rahnama, A., 2020. The effect of nitrogen fertilizer on some growth traits and yield of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) irrigated with sugar-cane fields drainage water. Iran J. Soil Water Res. 51(6), 1441–1455. https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.294227.668432. (In Persian with English abstract)
29. Rasouli Sadaghiani, M.H., Sepehr, E., 2011. The effect of sewage sludge and manures application on nitrogen mineralization and rhizosphere characteristics in corn and sunflower plants. JSW. 25(2), 327–337. https://doi.org/10.22067/JSW.V0I0.9386. (In Persian with English abstract).
30. Razzaghi, F., Jacobsen, S.E., Jensen, C.R., Andersen, M.N., 2014. Ionic and photosynthetic homeostasis in quinoa challenged by salinity and drought–mechanisms of tolerance. Funct. Plant Biol. 42(2), 136–148. https://doi.org/10.1071/FP14132.
31. Rehman, R.A., Qayyum, M.F., Haider, G., Schofield, K., Abid, M., Rizwan, M., Ali, S., 2021. The sewage sludge biochar and its composts influence the phosphate sorption in an alkaline-calcareous soil. Sustainability 13(4), 1779. https://doi.org/10.3390/su13041779.
32. Salehi, M., Dehghany, F., 2024. Determination of salinity stress tolerance threshold of quinoa genotypes under field conditions. Environ. Stress. Crop Sci. 16(4), 1123–1137. https://dx.doi.org/10.22077/ESCS.2023.5309.2138. (In Persian with English abstract)
33. Shahbazi, F., Ghasemi, S., Sodaeizadeh, H., Pourdara, H., Ayaseh, K., 2018. The effects of sewage sludge on some physical and chemical properties of soil and wheat yield. Water-Soil 28(2), 191–203. (In Persian with English abstract)
34. Shahbazi, F., Hosseinpur, A.R., Motaghian, H.R., 2019. Effect of P fertilizer and sewage sludge on availability and factions of P and maize (*Zea Mays* L.) indices in a calcareous soil. J. Soil Manage. Sust. Prod. 9(2), 45–63. http://ejsms.gau.ac.ir doi:10.22069/ejsms.2019.15468.1832. (In Persian with English abstract)
35. Sharpley, A.N., 1995. Soil phosphorus dynamics: agronomic and environmental impacts. Ecol. Eng. 5(2-3), 261–279. https://doi.org/10.1016/0925-8574(95)00027-5.
36. Taaime, N., El Mejahed, K., Choukr-Allah, R., Bouabid, R., Oukarroum, A., El Gharous, M., 2023. Optimization of macronutrients for improved grain yield of quinoa (*Chenopodium quinoa* Wild.) crop under semi-arid conditions of Morocco. Front. Plant Sci. 14, 1146658. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1146658.
37. United States Environment Protection Agency (USEPA), 1995. A Plain English Guide to the EPA Part 503 Biosolids Rule. Environmental Protection Agency, Washington, DC.
38. Vaseghi, S., Afyuni, M., Shariatmadari, H., Mobli, M., 2005. Effect of sewage sludge on some macronutrients concentration and soil chemical properties. J. Water Wastewater. 16(1), 15–22. (In Persian with English abstract)
39. Wagdi, E.M., Metwally, S.M., Matar, M.K., Yousef, N.N., 2013. Effect of phosphorus in alleviation of adverse impacts of salinity on wheat grown on different soils. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 44(13), 1921–1936. https://doi.org/10.1080/00103624.2013.795227.
40. 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 Sci. 37(1), 29–38. http://dx.doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003.
41. Youssef, M.A., Farag, M.I.H., 2021. Co-application of organic manure and bio-fertilizer to improve soil fertility and production of quinoa and proceeding Jew's mallow crops. J. Soil Sci. Plant Nutr. 21(3), 2472–2488. https://doi.org/10.1007/s42729-021-00538-5.
42. Yu, Q., Zheng, Y., Wang, Y., Shen, L., Wang, H., Zheng, Y., He, N., Li, Q., 2015. Highly selective adsorption of phosphate by pyromellitic acid intercalated ZnAl-LDHs: assembling hydrogen bond acceptor sites. J. Chem. Eng. 260, 809–817. https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.09.059.