

Effects of Phosphoric Acid Application on Concentrations of Chlorophyll, Nitrogen, Phosphorus, and Potassium, and Agronomic Traits of Corn Plant in Two Different Soils

Maryam Shakoori¹, Akbar Hassani², Mohammad Babaakbari Sari³,
Mehdi Tafvizi⁴, Ehsan Khoshkalam⁵

1-Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

E-mail: maryamshakoori482@gmail.com

2-Corresponding Author, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

E-mail: akbar.hassani@znu.ac.ir

3-Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

E-mail: babaakbari@znu.ac.ir

4-Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

E-mail: tafvizi.m.s@gmail.com

5-Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

E-mail: e.khoshkalam@gmail.com

Received: April 30, 2025

Revised: May 26, 2025

Accepted: June 10, 2025

Published: June 12, 2025

Extended Abstract

Background and Objectives

Calcareous soils, typically found in arid and semi-arid regions of the world, cover approximately one-third of the Earth's surface. The high lime content and elevated pH level of these soils often limit the availability of nutrients such as phosphorus to plants. To address this issue, farmers commonly use various acids, such as phosphoric acid to supply the necessary phosphorus for plant growth and to improve soil conditions, which can also enhance the availability of other nutrients. Therefore, this study aimed to evaluate the effects of different concentrations of phosphoric acid on leaf chlorophyll concentration, antioxidant capacity, and agronomic traits of corn (*Zea mays* L.) plants in two different soils.

Materials and Methods

To conduct the experiment, two soils with different textures (clay loam and sandy loam) were collected from a depth of 0–25 cm in Tehran and Alborz provinces. After air-drying, the soil samples were passed through a 2-mm sieve. The experiment was carried out in a greenhouse using a completely randomized design with four treatments and three replications. Four levels of phosphoric acid (0.0, 0.25, 0.5, and 1.0 g per kg of soil) were applied as experimental treatments. Industrial-grade phosphoric acid with a purity of 40% (H_3PO_4) was used in this study. Following the addition of phosphoric acid, the soils in the pots were homogenized through eight wetting-drying cycles. Subsequently, 10 maize seeds (*Zea mays* L.) cv. single cross 704 were sown in each pot. After germination and at the two-leaf stage, four vigorous seedlings were retained in each pot, and the others were removed. Throughout the growth period, parameters such as germination rate, plant height, and growth rate were measured. At the end of the 45-day experimental period, fresh and dry weights of shoots and roots, plant height, leaf chlorophyll concentration, carotenoids concentration, antioxidant activity, soluble solids, leaf number, and also concentrations of nitrogen, phosphorus and potassium in shoot and root of plants were measured.

Results

The results demonstrated that phosphoric acid application had no significant effect on leaf number and germination percentage in both studied soils. Moreover, in sandy loam soil, phosphoric acid application had no significant impact on plant height and overall growth rate. Conversely, in clay loam soil, phosphoric acid application led to an increase in plant

height, with the maximum enhancement (27.8%) recorded at the level of 0.5 g/kg. Although different concentrations of phosphoric acid improved growth rate in clay loam soil, their effect on growth rate in sandy loam soil was not statistically significant. The phosphoric acid application resulted in increases in fresh and dry weights of shoot and root in both soils. In clay loam soil, the greatest increases in shoot fresh weight (69.3%) and root fresh weight (30.7%) were recorded at the phosphoric acid levels of 0.25 and 0.5 g/kg, respectively. In clay loam soil, the maximum increase in root dry weight (30.7%) and shoot dry weight (55.4%) were obtained at the phosphoric acid levels of 0.5 and 0.25 g/kg, respectively. In sandy loam soil, phosphoric acid had no significant effect on shoot and root dry weights and shoot fresh weight. However, it significantly enhanced nitrogen, phosphorus, and potassium concentrations in both shoot and root of plants in both studied soils. Similarly, significant increases were observed in chlorophyll a, b, and total chlorophyll concentrations in both studied soils. The effect of phosphoric acid on carotenoids concentration in clay loam soil was not statistically significant. Whereas in sandy loam soil, carotenoid levels declined with increasing the level of phosphoric acid, with the greatest reduction (66.2%) observed at the level of 1.0 g/kg. The application of phosphoric acid also significantly increased soluble solids content in both studied soils, with the highest increase recorded at 61.4% in clay loam soil and 46.1% in sandy loam soil. The highest antioxidant activity was observed at the levels of 1.0 and 0.25 g/kg in clay loam soil and sandy loam soil, respectively. Furthermore, phosphoric acid significantly affected soil pH and electrical conductivity. In clay loam soil, the application of phosphoric acid at the levels of 0.25, 0.5, and 1.0 g/kg reduced soil pH by 0.33%, 1.54%, and 2.73%, respectively, compared to the control, while the corresponding reductions in sandy loam soil were 0.66%, 0.92%, and 1.49%. Electrical conductivity increased in both soils, with the highest increases 12.1% in clay loam soil and 21.0% in sandy loam soil recorded under the phosphoric acid level of 1.0 g/kg.

Conclusion

The results of this study demonstrate that phosphoric acid application enhanced maize growth in both studied soils, with a more substantial effect observed in clay loam soil. As this experiment focused on a short-term assessment of phosphoric acid's influence, it is recommended that future studies be conducted over longer durations and under field conditions to more accurately evaluate its long-term effects. Moreover, assessing soil properties potentially affected by phosphoric acid application at both pre- and post-planting would contribute to a more comprehensive understanding of its overall impact.

Key words: Antioxidant capacity, Calcareous soil, Chlorophyll, Phosphorus, Plant nutrition, Soil amendment.

Author Contributions

Conceptualization, A.H and M.B.S; methodology, M.S; Performing experiments and measurements, M.T; software, A.H; validation, E.Kh.; formal analysis, M.B.S and A.H.; data curation, M.S. and M.T.; writing—original draft preparation, E.Kh and A.H.; writing—review and editing, M.B.S and A.H.; visualization, M.B.S.; supervision, A.H.; project administration, A.H.; funding acquisition, All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

Data is available on reasonable request from the authors.

Acknowledgements

This paper is published as a part of a PhD's thesis supported by the Vice Chancellor for Research and Technology of the University of Zanjan, Zanjan, Iran. The authors are thankful to the University of Zanjan for financial supports.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Cite this article: Shakoori, M., Hassani, A., Babaakbari Sari, M., Tafvizi, M. & Khoshkalam, E. (2025). Effects of phosphoric acid application on concentrations of chlorophyll, nitrogen, phosphorus, and potassium, and agronomic traits of corn plants in two different soils. *Journal of Soil and Plant Science*, 35(2), 1–22.

<https://doi.org/10.22034/sps.2025.66931.1006>

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



Copyright © 2025 The Authors.
Publisher: The University of Tabriz





مقاله پژوهشی

تأثیر مصرف فسفریک اسید بر غلظت کلروفیل، نیتروژن، فسفر و پتاسیم و صفات زراعی گیاه ذرت در دو خاک مختلف

مریم شکوری^۱، اکبر حسنی^۲✉، محمد بابا اکبری ساری^۳، مهدی تقوی‌زی^۴، احسان خوش کلام^۵

۱- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: maryamshakoori482@gmail.com

۲- نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

رایانامه: akbar.hassani@znu.ac.ir

۳- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: babaakbari@znu.ac.ir

۴- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: tafvizi.m.s@gmail.com

۵- گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: e.khoshkalam@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۰	تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۰۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۰	تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۳/۲۲

چکیده

در این پژوهش، اثر مصرف فسفریک اسید صنعتی (H_3PO_4) با خلوص ۴۰ درصد بر رشد گیاه ذرت (*Zea mays* L.) رقم سینگل کراس ۷۰۴ در دو خاک با بافت لوم رسی و لوم شنی طی یک دوره رشد ۴۵ روزه بررسی شد. آزمایش در گلخانه و در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۴ تیمار و ۳ تکرار انجام شد. تیمارها شامل شاهد و فسفریک اسید در سه سطح ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱/۰ گرم بر کیلوگرم خاک بودند. نتایج نشان داد که در هر دو خاک، اثر فسفریک اسید بر درصد جوانه‌زنی و تعداد برگ معنادار نبود. در خاک لوم رسی، مصرف فسفریک اسید با دوز ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد باعث افزایش سرعت رشد، ارتفاع بوته، وزن تر بخش هوایی و ریشه، وزن خشک بخش هوایی و ریشه شد که در مقایسه با تیمار شاهد مقدار افزایش به ترتیب برابر با ۳۰/۷، ۲۸/۸، ۶۹/۳، ۳۰/۷ و ۵۵/۴ درصد بود. همچنین، مصرف فسفریک اسید سبب افزایش غلظت کلروفیل برگ‌ها، مواد جامد محلول، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی، غلظت فسفر، نیتروژن و پتاسیم بخش هوایی و ریشه شد اما بر غلظت کارتنوئید برگ‌ها اثر معنادار نداشت. در خاک لوم شنی، اثر فسفریک اسید بر وزن خشک بخش هوایی و ریشه و وزن تر بخش هوایی معنادار نبود اما بر وزن تر ریشه، غلظت کلروفیل برگ‌ها، مواد جامد محلول، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و غلظت فسفر، نیتروژن و پتاسیم بخش هوایی و ریشه، معنادار بود. نتایج نشان داد که اثر فسفریک اسید بر pH و قابلیت هدایت الکتریکی (EC) خاک معنادار بود. در هر دو خاک لوم رسی و لوم شنی، تیمار ۰/۱ درصد فسفریک اسید، pH دو خاک را به ترتیب ۲/۷ و ۱/۵ درصد کاهش داد. در مقابل، EC دو خاک را به ترتیب ۱۲/۱ و ۲۱/۰ درصد افزایش داد. در خاک لوم رسی، اثر فسفریک اسید بر گیاه ذرت در مقایسه با خاک لوم شنی بیشتر بود. در شرایطی که خاک دارای مقادیر بالای آهک و pH است، توصیه می‌شود از فسفریک اسید به عنوان منبع تأمین فسفر و برای اصلاح pH خاک استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: اصلاح خاک، تغذیه گیاه، خاک آهکی، فسفر، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی، کلروفیل

استناد به این مقاله: شکوری، م.، حسنی، ا.، بابا اکبری ساری، م.، تقوی‌زی، م. و خوش کلام، ا. (۱۴۰۴). تأثیر مصرف فسفریک اسید بر غلظت کلروفیل، نیتروژن، فسفر و پتاسیم و صفات زراعی گیاه ذرت در دو خاک مختلف. نشریه دانش خاک و گیاه، ۳۵(۲)، ۱-۲۲.

<https://doi.org/10.22034/sps.2025.66931.1006>

مقدمه

خاک‌های آهکی به‌طور گسترده در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان پراکنده شده‌اند و از نظر وسعت حدود یک سوم سطح خشکی‌های جهان را در بر گرفته‌اند (Marschner, 1995; Bolan et al., 2023). محدودیت‌های اصلی بهره‌وری محصول در این قبیل خاک‌ها کمبود برخی عناصر غذایی از قبیل فسفر است (Bolan et al., 2023). همچنین، به‌دلیل بالا بودن pH در این خاک‌ها فراهمی برخی عناصر غذایی مورد نیاز گیاه از قبیل، آهن، منگنز، روی و مس نیز کاهش می‌یابد. بنابراین، به دلیل تأثیر pH خاک بر فراهمی عناصر غذایی، مدیریت اصولی تغذیه گیاه در خاک‌های آهکی با خاک‌های غیرآهکی متفاوت است (Wahba et al., 2019). حاصلخیزی خاک یکی از عوامل اصلی مؤثر بر تولید محصول است که عمدتاً تحت تأثیر ظرفیت ذاتی عناصر غذایی خاک (توان طبیعی خاک در تأمین و نگهداری عناصر غذایی)، شیوه‌های کشاورزی مانند نظام‌های کشت و شیوه‌های کوددهی است (Srinivasarao et al., 2021).

فسفر یک عنصر ضروری پرمصرف است که تقریباً در تمام فرایندهای متابولیک و بیوشیمیایی گیاه نقش دارد (Chakraborty & Prasad, 2019; Wahid et al., 2020). عرضه محدود فسفر طبیعی موجود در خاک، که عمدتاً از مواد معدنی اولیه منشأ گرفته و به‌تدریج در اختیار گیاه قرار می‌گیرد، منجر به وابستگی قابل توجه به مصرف کودهای فسفوری برای تأمین نیاز گیاه به این عنصر حیاتی شده است (Brownrigg et al., 2022). با این حال، در مناطق خشک و نیمه‌خشک، پس از مصرف کودهای فسفوری، به دلیل وجود آهک آزاد، کلسیم و منیزیم در خاک‌های آهکی، مقدار فسفر قابل جذب برای گیاهان کاهش می‌یابد (Hussain et al., 2011). بنابراین، با مصرف کودهای فسفوری در خاک‌های آهکی، بخش بیشتری از کود در خاک تثبیت شده و تنها بخش کمی از آن (حدود ۲۰ درصد) در اختیار گیاه قرار می‌گیرد (Hopkins & Ellsworth, 2005). در واقع، مدیریت عناصر غذایی در خاک‌های آهکی با خاک‌های غیرآهکی تفاوت دارد، چرا که pH بالای خاک‌های آهکی بر دسترسی گیاه به عناصر غذایی و نیز بر واکنش‌های شیمیایی مؤثر بر تثبیت یا هدررفت برخی عناصر غذایی تأثیرگذار است (Bolan et al., 2023).

کشاورزان برای اصلاح خاک و بهبود فراهمی فسفر برای گیاهان از اسیدهای آلی یا معدنی در خاک استفاده می‌نمایند. در واقع، استفاده از اسیدهای معدنی در خاک‌های آهکی رایج است، زیرا این ترکیبات با کاهش pH محلول خاک، به بهبود شرایط جذب عناصر غذایی کمک می‌کنند (Bertrand et al., 2006). فسفریک اسید با کاهش pH خاک‌های آهکی، حل شدن ترکیبات نامحلول کلسیم فسفات را افزایش داده و جذب فسفر و عناصر غذایی کم‌مصرف مانند آهن و روی را بهبود می‌بخشد (Mohamed, 2021; Bolan et al., 2023). همچنین، با کاهش تثبیت فسفر، دسترسی گیاه به این عنصر افزایش می‌یابد (Hopkins & Ellsworth, 2005; Etemadian et al., 2018). مصرف فسفریک اسید با افزایش فعالیت میکروبی، چرخه عناصر غذایی را در خاک تقویت می‌کند (McBeath et al., 2007). علاوه بر کاهش pH و افزایش فسفر قابل جذب، جذب سایر عناصر مانند نیتروژن و پتاسیم را نیز بهبود می‌دهد (Hussain et al., 2011; Yusuf et al., 2017). برخی محققان بیان کردند که کاهش pH خاک به طور موقت انجام می‌شود و در نهایت به دلیل ظرفیت بافری بالای خاک به مقدار اولیه خود می‌رسد (Ameen et al., 2019).

مطالعات نشان داده است که فسفریک اسید می‌تواند به‌عنوان جایگزینی کارآمد برای کودهای فسفوری معمولی، عملکرد گیاهانی مانند گندم، ذرت و سیب‌زمینی را در شرایط مزرعه افزایش دهد. همچنین، به نظر می‌رسد استفاده مستقیم از فسفریک اسید از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه باشد، زیرا نیاز به مراحل مختلف تولید کودهای فسفوری را حذف می‌کند (Akhtar et al., 2016). ضمن این‌که منابع فسفر به شکل مایع، تحرک فسفر را در مقایسه با کودهای فسفر دانه‌ای افزایش می‌دهد (Lombi et al., 2004). در پژوهشی چند نوع اسید آلی و معدنی شامل اسیدهای استیک، سیتریک، اگزالیک، فسفریک و سولفوریک بر رهاسازی عناصر غذایی بررسی و بیان شد که در بین موارد ذکر شده، فسفریک اسید بیشترین تأثیر را

بر کاهش مقدار pH خاک داشت (Etemadian et al., 2018). همچنین، نشان داده شده است که استفاده از فسفریک اسید عملکرد و وزن دانه گندم را به طور قابل توجهی افزایش داد (Akhtar et al., 2016). در تحقیق دیگر، افزایش عملکرد گیاه گندم با مصرف فسفریک اسید گزارش شده است (Hashmi et al., 2017). استفاده از فسفریک اسید نه تنها باعث افزایش دسترسی به عناصر غذایی برای گیاه می شود، بلکه ویژگی های خاک را نیز بهبود می بخشد (Ameen et al., 2019). بیان شده است که فسفریک اسید موجب افزایش قابل توجه قطر و ارتفاع گیاه می گردد و افزودن آن می تواند موجب تحریک پاسخ رشد، افزایش وزن خشک گیاه و بهبود جذب نیتروژن و فسفر شود (Rengrudkij & Partida, 2003). در پژوهشی گزارش گردید که گیاهان گندم در ۸۶ درصد از خاک های آزمایش شده ($n=27$) به مصرف کود فسفر پاسخ نشان دادند. از میان این خاک ها، گیاهان در ۶۲ درصد به مصرف کود فسفر پاسخ مثبت دادند. در این موارد، منابع فسفر به شکل مایع، در مقایسه با کود های جامد و دانه ای، تأثیر قابل توجهی داشتند. این تفاوت به افزایش فراهمی فسفر برای جذب توسط گیاه نسبت داده شد (McBeath et al., 2007).

گیاه ذرت یکی از گیاهان مهم است که در بسیاری از مناطق ایران کشت می شود. با این حال، خاک های ایران معمولاً دارای مقادیر بالای آهک هستند که این موضوع باعث بروز کمبود برخی عناصر غذایی از جمله فسفر، برای گیاه می شود. بر همین اساس، کشاورزان در زمین های کشاورزی برای تأمین نمودن عناصر مورد نیاز گیاهان از کود های شیمیایی و آلی استفاده می کنند. در بسیاری از خاک های آهکی، محدودیت های ناشی از pH بالا موجب کاهش کارایی کود های فسفوری و در نتیجه کاهش عملکرد گیاهان می شود. با این که تحقیقات زیادی به بررسی تأثیر منابع مختلف فسفر بر رشد گیاهان پرداخته اند، مطالعات کمتری اثر مستقیم فسفریک اسید بر دسترسی فسفر و سایر ویژگی های فیزیولوژیکی گیاه را در شرایط کنترل شده بررسی کرده اند. بنابراین، در پژوهش حاضر، اثر مقادیر مختلف فسفریک اسید بر غلظت کلروفیل، ظرفیت آنتی اکسیدانی و صفات زراعی گیاه ذرت در دو خاک مختلف (لوم شنی و لوم رسی) بررسی شد.

مواد و روش ها

تأثیر مصرف خاکی فسفریک اسید بر رشد و صفات زراعی گیاه ذرت، در دو خاک مختلف با بافت لوم رسی و لوم شنی بررسی شد. هر دو خاک از عمق ۰ تا ۲۵ سانتی متری جمع آوری شد. نقطه نمونه برداری خاک لوم رسی و لوم شنی به ترتیب واقع در جاده فیروز آباد - ری در استان تهران (طول جغرافیایی ۵۱/۴۷۳۴ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵/۵۵۳۷ درجه شمالی) و جاده شهریار - کرج در استان البرز (طول جغرافیایی ۵۱/۰۲۸۵ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵/۷۳۴۹ درجه شمالی) بود. برای جلوگیری از آلودگی احتمالی، نمونه برداری خاک از فاصله حداقل ۲۰ متری حاشیه جاده آسفalte و از ناحیه ای بدون سابقه مصرف کود و سم انجام شد. خاک مورد نیاز از چند نقطه جمع آوری و با هم مخلوط و همگن سازی شد (نمونه مرکب). سپس، نمونه های خاک هوا خشک و از الک دو میلی متر عبور داده شدند. قبل از کشت گیاه، برخی ویژگی های خاک شامل بافت خاک به روش هیدرومتری (Bouyoucos, 1962)، pH خاک (Thomas, 1996) و قابلیت هدایت الکتریکی (Rhoades et al., 1989) در عصاره اشباع، کلسیم کربنات معادل به روش تیتراسیون برگشتی (Loeppert & Suarez, 1996)، کربن آلی به روش والکی و بلک (Walkley & Black, 1934)، نیتروژن به روش کج دال (Bremner, 1996)، پتاسیم قابل جذب به روش آمونیوم استات ۱ مولار و pH=۷ (Thomas, 1983)، فسفر قابل جذب به روش اولسن (Olsen, 1954) و آهن، منگنز، روی و مس قابل جذب به روش DTPA (Lindsay & Norvell, 1978) اندازه گیری شدند. نتایج به دست آمده در جدول ۱ نشان داده شد.

آزمایش در سال ۱۴۰۳ در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان و در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۴ تیمار و ۳ تکرار اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل چهار سطح فسفریک اسید (صفر، ۰/۵، ۱/۰ و ۱/۲۵ گرم بر کیلوگرم خاک) بودند. فسفریک اسید استفاده شده دارای گرید صنعتی با درجه خلوص ۴۰ درصد (H_3PO_4) و چگالی ۱/۲۵ گرم بر میلی لیتر

بود. با در نظر گرفتن دو نوع خاک استفاده شده در آزمایش، تعداد واحدهای آزمایشی برابر با ۲۴ بود. کشت گیاهان در گلدان‌های پلاستیکی سه کیلوگرمی انجام شد. گلدان‌های استفاده‌شده فاقد سوراخ زهکش بودند. دلیل انتخاب این نوع گلدان‌ها، جلوگیری از خروج محلول فسفریک اسید و مواد غذایی محلول از بستر خاک بود تا بتوان اثر کامل تیمار اسیدی را در داخل خاک حفظ و بررسی کرد. برای هر یک از گلدان‌ها، تیمار فسفریک اسید به صورت وزنی-وزنی و همراه با آب مقطر به خاک گلدان اضافه شد. پس از افزودن فسفریک اسید و پیش از کاشت گیاهان، خاک گلدان‌ها در هشت نوبت متوالی تحت چرخه‌های تر و خشک قرار گرفت. در هر چرخه، رطوبت خاک ابتدا تا حد ظرفیت مزرعه تنظیم شد و سپس تا مرحله خشک شدن کاهش یافت. هدف این فرایند کاهش ناپایداری‌های اولیه ناشی از مخلوط کردن و یکنواخت سازی واکنش خاک پیش از اعمال تیمارها بود.

قبل از مرحله کشت، بذری گیاه ذرت (*Zea mays* L.) رقم سینگل کراس ۷۰۴ 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). سپس در هر گلدان ۱۰ عدد بذر کشت شد و پس از جوانه‌زنی و در مرحله دو برگ، چهار بوته قوی در هر گلدان نگهداری و بقیه حذف شدند. در طول دوره کشت (۴۵ روز)، آب مورد نیاز گلدان‌ها در حد ظرفیت مزرعه و بر پایه وزن گلدان و کاهش رطوبت بین دو نوبت تنظیم شد تا شرایط یکنواختی برای رشد گیاهان فراهم شود. دمای گلخانه 29 ± 2 درجه سلسیوس و رطوبت نسبی هوا در گلخانه بین ۵۰ تا ۷۰ درصد حفظ شد. ضمن این‌که طول دوره روشنایی برای هر روز ۱۲ ساعت در نظر گرفته شد. پس از جوانه‌زنی بذرها، درصد جوانه‌زنی در هر یک از گلدان‌ها محاسبه گردید. ضمن این‌که، پس از مرحله جوانه‌زنی تا مرحله برداشت، ارتفاع بوته‌ها در چهار زمان مختلف (۷، ۱۶، ۳۰ و ۴۵ روز) اندازه‌گیری شد. میانگین سرعت رشد گیاه^۱ (AGR) در سه مرحله زمانی (۱۶، ۳۰ و ۴۵ روز) با استفاده از رابطه ۱ محاسبه گردید (Hunt., 2012).

$$AGR = \frac{H_2 - H_1}{t_2 - t_1} \quad (1)$$

در رابطه فوق، H و t به ترتیب ارتفاع گیاه و زمان مورد نظر است. در پایان دوره کشت (۴۵ روز)، برخی ویژگی‌های نمونه‌های گیاهی به شرح زیر اندازه‌گیری شدند.

غلظت کلروفیل و کاروتنوئید

غلظت کلروفیل و کاروتنوئید به روش آرنون (1967) اندازه‌گیری شد. به‌طور خلاصه، ۰/۱ گرم از بافت تازه گیاهی هر یک از نمونه‌ها توزین شده و همراه با ۱۰ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد، داخل هاون چینی به‌طور کامل ساییده شدند. محلول‌های به دست آمده داخل فالکون به مدت ۳۰-۱۵ دقیقه و در تاریکی قرار داده شدند. سپس، نمونه‌ها با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ در دور ۳۰۰۰ به مدت ۱۰ دقیقه تفکیک گردیدند. در ادامه، میزان جذب نور در طول موج‌های ۶۴۳ و ۶۴۵ نانومتر به ترتیب برای اندازه‌گیری غلظت کلروفیل a و b با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت گردید. برای اندازه‌گیری مقدار کاروتنوئید، جذب نور در طول موج‌های ۴۸۰ و ۵۱۰ نانومتر قرائت شد. با استفاده از روابط زیر غلظت کلروفیل و کاروتنوئید محاسبه و گزارش شد.

$$\text{Chlorophyll a} = (12.7 \times A663 - 2.69 \times A645) \times (V/W) \quad (2)$$

$$\text{Chlorophyll b} = (22.9 \times A645 - 4.68 \times A663) \times (V/W) \quad (3)$$

$$\text{Carotenoids} = (7.6 \times A480 - 1.49 \times A510) \times (V/W) \quad (4)$$

در روابط ذکر شده، A663 و A645 به ترتیب مقدار جذب در طول موج‌های ۶۴۵ و ۶۴۳ نانومتر، A480 و A510 به ترتیب مقدار جذب در طول موج‌های ۴۸۰ و ۵۱۰ نانومتر، V حجم نهایی نمونه به میلی‌لیتر و W وزن تر برگ به گرم است.

^۱- Average growth rate

مواد جامد محلول، فعالیت آنتی اکسیدانی

غلظت مواد جامد محلول با استفاده از دستگاه رفراکتومتر اندازه‌گیری شد (Paul et al., 2010). برای تعیین فعالیت آنتی اکسیدانی، با استفاده از رادیکال آزاد DPPH (2,2-Diphenyl- Picryl- Hydrazyl) استفاده شد (Akpinar-Bayizit et al., 2016). ابتدا محلول DPPH با انحلال ۷/۸۹ میلی گرم DPPH در ۲۰۰ میلی لیتر متانول خالص تهیه شد. سپس ۲۰۰ میکرو لیتر از عصاره گیاهی به فالكون منتقل و ۳۸۰۰ میکرو لیتر محلول DPPH اضافه شد. مخلوط به دست آمده به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۲۵ درجه سلسیوس در محیط آزمایشگاه و در شرایط تاریکی انکوبه شد. سپس جذب در طول موج ۵۱۷ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت گردید. جذب نمونه شاهد تهیه شده با استفاده از همان مقدار متانول و محلول DPPH برای کالیبراسیون دستگاه و کنترل منفی استفاده شد. در نهایت با استفاده از رابطه زیر درصد فعالیت مهار رادیکال DPPH محاسبه گردید.

$$I\% = [(A_0 - A_1) / A_0] \times 100 \quad (5)$$

A_0 = جذب نمونه، A_1 = جذب شاهد (حاوی همه اجزا واکنشگر بدون نمونه)

بخش هوایی و ریشه گیاه پس از جدا کردن از خاک گلدان‌ها، با استفاده از ترازوی با دقت ۰/۰۱ گرم توزین شدند. سپس نمونه‌های گیاهی در آون در دمای ۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت خشک شدند. نمونه‌های خشک شده توزین شده و پس از آسیاب کردن، به روش میکروویو، هضم گردیدند. در این روش، هضم اسیدی نمونه‌های گیاهی در شرایط بسته و کنترل شده دما و فشار با استفاده از سیستم میکروویو انجام شد. مقدار ۰/۵ گرم نمونه خشک پودر شده داخل لوله‌های تفلون مخصوص دستگاه میکروویو ریخته و به آن پنج میلی لیتر نیتریک اسید غلیظ و دو میلی لیتر آب اکسیژنه اضافه شد. لوله‌ها داخل دستگاه میکروویو قرار داده شد و مطابق برنامه دستگاه تنظیم و عمل هضم انجام شد. در بخش هوایی و ریشه غلظت فسفر به روش زرد (مولیبدوانادات) (Chapman & Pratt, 1961)، نیتروژن به روش کج‌دال (Bremner, 1996) و پتاسیم با استفاده از دستگاه فلیم‌فتومتر اندازه‌گیری شد.

تحلیل آماری داده‌ها

تحلیل آماری داده‌ها با نرم‌افزار SAS 9.4 و مقایسه میانگین‌ها به روش آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. از نرم‌افزار Excel برای ترسیم نمودارها استفاده شد.

نتایج

نتایج تجزیه خاک

در جدول ۱ نتایج برخی ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در دو نمونه خاک نشان داده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، بافت دو نوع خاک استفاده شده در آزمایش لوم شنی و لوم رسی بود. با توجه به مقادیر بالای pH و درصد کلسیم کربنات معادل، هر دو خاک در این پژوهش دارای ماهیت آهکی بودند (جدول ۱) و این ویژگی‌ها با مشخصات خاک‌های آهکی (pH بالای ۷، کلسیم کربنات بالای ۱۵ درصد) مطابقت داشت (Bolan et al., 2023). همچنین، بر اساس مقادیر به دست آمده برای کربن آلی (جدول ۱)، میزان ماده آلی خاک کم بود (Huang et al., 2009). غلظت فسفر قابل دسترس در دو خاک لوم رسی و لوم شنی مورد مطالعه به ترتیب ۱۶ و ۱۲ میلی گرم بر کیلوگرم بود. محققان مقادیر بحرانی فسفر خاک به روش اولسن را در محدوده ۳/۹ تا ۱۵ میلی گرم بر کیلوگرم گزارش داده‌اند (Tang et al., 2009). در خاک لوم شنی غلظت فسفر کمتر از سطح بحرانی فسفر خاک (۱۵ میلی گرم در کیلوگرم) بود و در خاک لوم رسی نزدیک به سطح بحرانی و کمی بالاتر از آن بود.

جدول ۱- نتایج برخی ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی اندازه‌گیری شده در نمونه‌های خاک.

شماره خاک	رس	سیلت (%)	شن	بافت خاک	pH	EC (dS/m)	کربن آلی	کلسیم کربنات معادل (%)	نیترژن کل
۱	۱۴	۱۶	۷۰	لوم شنی	۷/۴۸	۰/۹۸	۰/۷۵	۱۹/۲۵	۰/۳
۲	۲۸	۳۰	۴۲	لوم رسی	۷/۸۲	۱/۸۸	۰/۳۳	۲۲	۰/۱۲

ادامه جدول ۱- غلظت عنصرهای غذایی قابل جذب گیاه در دو خاک مورد مطالعه

Cu	Zn	Mn	Fe	P	K
(mg/kg)					
۰/۸۴	۰/۶۵	۳/۷	۴/۴	۱۲	۲۳۰
۰/۵۷	۰/۸	۳/۵	۳/۱	۱۶	۴۶۳

تأثیر فسفریک اسید بر صفات زراعی گیاه ذرت

درصد جوانه‌زنی، تعداد برگ، ارتفاع بوته

بر اساس نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲)، مصرف فسفریک اسید در خاک لوم رسی و لوم شنی اثر معناداری بر درصد جوانه‌زنی و تعداد برگ نداشت. ارتفاع بوته گیاه تحت تأثیر مصرف فسفریک اسید در چهار زمان مختلف شامل روز هفتم، ۱۶ ام، ۳۰ ام و ۴۵ ام مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج تجزیه واریانس تغییرات ارتفاع بوته گیاه در خاک لوم رسی معنادار بود (جدول ۲) اما برای خاک لوم شنی تغییرات مشاهده شده از نظر آماری معنادار نبود. بر اساس نتایج مقایسه میانگین‌ها در خاک لوم رسی مصرف فسفریک اسید ارتفاع بوته را در مقایسه با تیمار شاهد افزایش داد (شکل ۱). بیشترین ارتفاع بوته مربوط به تیمار ۰/۰۲۵ درصد (۰/۲۵ گرم بر کیلوگرم) فسفریک اسید بود و با افزایش غلظت فسفریک اسید، مقدار افزایش ارتفاع بوته کاهش یافت.

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر مصرف فسفریک اسید در خاک بر برخی صفات زراعی گیاه ذرت.

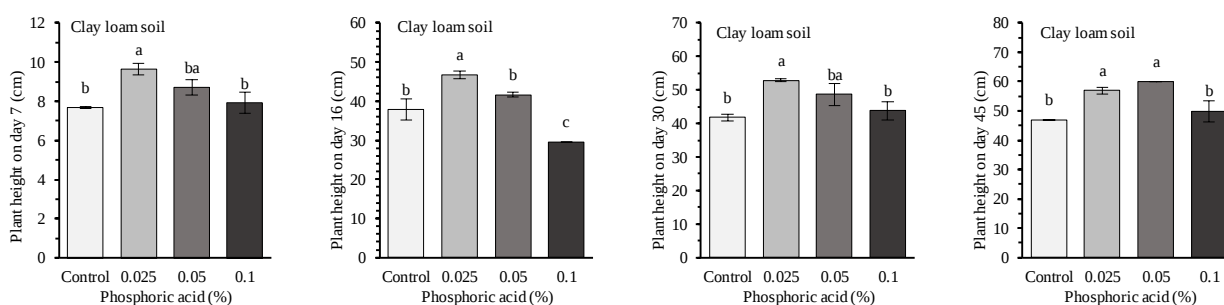
میانگین مربعات						منبع تغییر	درجه آزادی
تعداد برگ	درصد جوانه‌زنی	وزن تر ریشه	وزن تر بخش هوایی	وزن خشک ریشه	وزن خشک بخش هوایی		
خاک لوم رسی							
۲/۷۵ ^{NS}	۲۲/۲۲ ^{NS}	۵/۰۴۶*	۴۳/۱۵**	۰/۰۷۹۹*	۰/۹۹۵۵**	فسفریک اسید	۳
۲/۳۳	۲۵/۰۰	۱/۱۸۸	۰/۶۱	۰/۰۱۴۲	۰/۰۰۹۵	خطا	۸
۶/۶۷	۵/۱۷	۱۲/۸۰	۶/۷۶	۱۲/۱۰	۵/۳۲	ضریب تغییرات	-
خاک لوم شنی							
۰/۷۵ ^{NS}	۳۰/۵۵ ^{NS}	۲/۴۴۱**	۹/۴۴ ^{NS}	۰/۰۱۲۸ ^{NS}	۰/۱۲۶۶ ^{NS}	فسفریک اسید	۳
۰/۸۳	۷۵/۰۰	۰/۱۶۷	۲/۴۵	۰/۰۰۷۸	۰/۰۵۱۶	خطا	۸
۴/۶۶	۹/۲۰	۵/۱۲	۱۴/۹۷	۸/۴۷	۱۲/۶۱	ضریب تغییرات	-

^{NS}, *, ** به ترتیب غیرمعنادار و معنادار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

ادامه جدول ۲

منبع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات							
		ارتفاع بوته در روز				سرعت رشد در مرحله			
		روز هفتم	شانزدهم	سیام	چهل و پنجام	اول	دوم	سوم	نهایی
خاک لوم سی									
فسفریک اسید	۳	۲/۳۷*	۱۵۷/۶۱**	۷۴/۴۹*	۱۰۹/۶۲**	۱/۵۷۵**	۱/۲۱۹**	۰/۰۶۵ ^{NS}	۰/۰۵۹۷**
خطا	۸	۰/۴۰	۶/۱۴	۱۴/۳۴	۱۰/۷۸	۰/۰۸۲۷	۰/۳۳۵	۰/۰۲۰۳	۰/۰۰۵۵
ضریب تغییرات	–	۷/۴۸	۶/۳۶	۸/۰۹	۶/۱۴	۸/۴۹	۵۱/۵۶	۴۶/۹۹	۶/۲۸
خاک لوم شنی									
فسفریک اسید	۳	۲/۳۴ ^{NS}	۱۸/۸۲ ^{NS}	۱۸/۷۷ ^{NS}	۲۸/۷۵ ^{NS}	۰/۱۰۷ ^{NS}	۰/۰۳۳ ^{NS}	۰/۰۱۲۱ ^{NS}	۰/۰۲۳۳ ^{NS}
خطا	۸	۲/۵۲	۲۱/۴۵	۷/۹۲	۱۰/۷۹	۰/۳۳۱	۰/۱۵	۰/۰۱۳۶	۰/۰۰۷۲
ضریب تغییرات	–	۱۴/۳۰	۱۳/۴۰	۶/۲۹	۶/۱۷	۲۲/۰۵	۲۶/۵۷	۲۸/۲۸	۷/۴۹

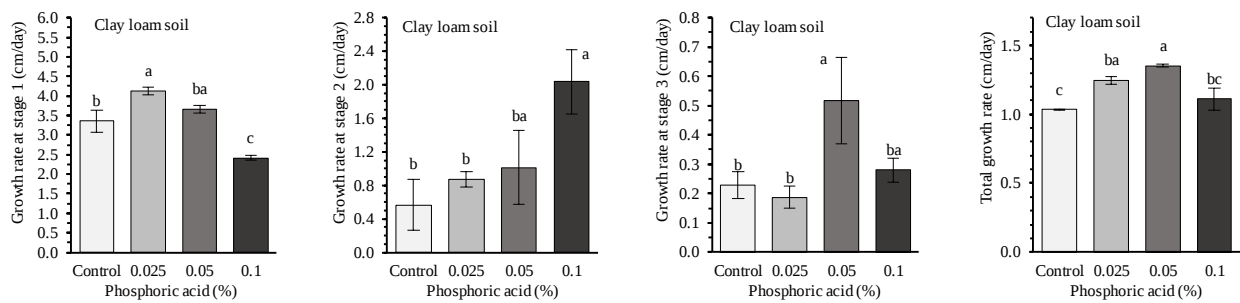
ns، *، ** به ترتیب غیرمعنادار و معنادار در سطح احتمال پنج و یک درصد.



شکل ۱ - اثر مصرف فسفریک اسید (درصد وزنی-وزنی) بر ارتفاع بوته گیاه ذرت در خاک لوم رسی در زمانهای مختلف. در هر صفت، میانگینهای دارای یک حرف لاتین مشترک با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنادار ندارند.

سرعت رشد گیاه

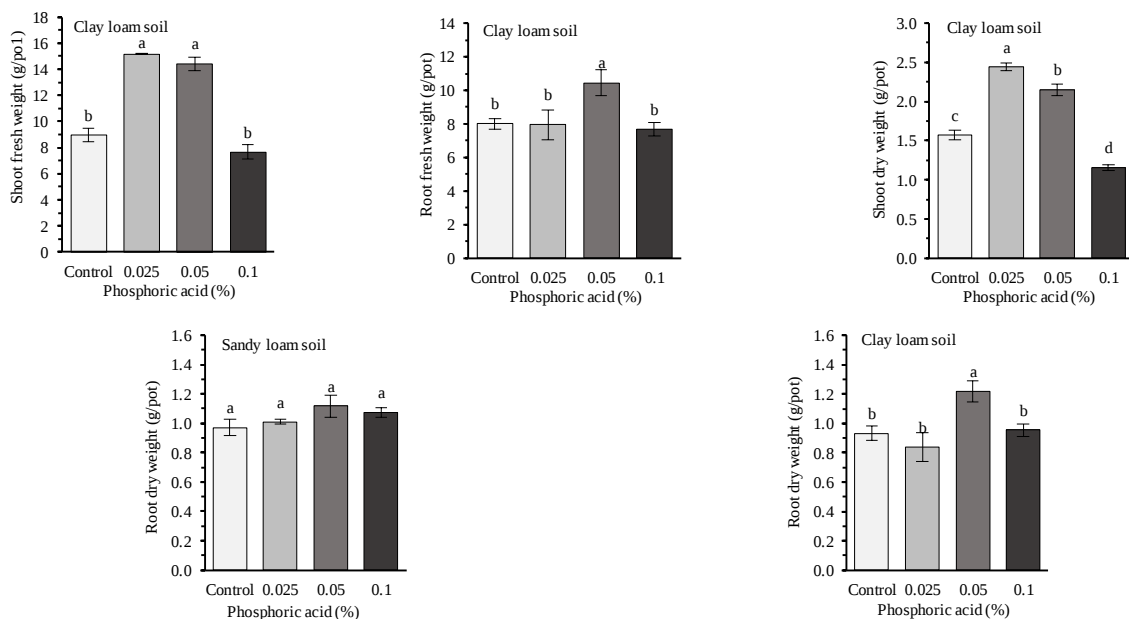
تأثیر مصرف فسفریک اسید بر سرعت رشد گیاه در خاک لوم رسی معنادار بود (جدول ۲). بررسی سرعت رشد گیاه ذرت در سه مرحله مختلف نشان داد که در خاک لوم رسی و در مرحله اول رشد، بیشترین سرعت رشد در تیمارهای ۰/۰۲۵ و ۰/۰۵ درصد فسفریک اسید مشاهده گردید که سرعت رشد را در مقایسه با تیمار شاهد به ترتیب ۲۳/۱ و ۹/۱ درصد افزایش دادند اما سرعت رشد گیاه در این مرحله تحت تأثیر غلظت ۰/۱ درصد فسفریک اسید به مقدار ۲۸/۱ درصد کاهش یافت (شکل ۲). در مرحله دوم رشد، بیشترین سرعت رشد گیاه مربوط به تیمار ۰/۱ درصد فسفریک اسید بود و بین تیمارهای ۰/۰۲۵، ۰/۰۵ و ۰/۱ درصد فسفریک اسید و تیمار شاهد تفاوت معنادار نبود. در مرحله سوم رشد، بیشترین سرعت رشد مربوط به تیمار ۰/۰۵ درصد فسفریک اسید بود و بین تیمار ۰/۱ درصد و ۰/۰۵ درصد تفاوت از نظر آماری معنادار نبود. به طور کلی، در خاک لوم رسی افزایش سرعت رشد در کل دوره در تیمارهای ۰/۰۲۵، ۰/۰۵ و ۰/۱ درصد فسفریک اسید در مقایسه با تیمار شاهد به ترتیب ۲۰/۷، ۳۰/۷ و ۷/۴ درصد بود که تأثیر تیمارهای ۰/۰۲۵ و ۰/۰۵ درصد فسفریک اسید در مقایسه با غلظت ۰/۱ درصد بیشتر بود. با بررسی سرعت رشد گیاه در خاک لوم شنی مشاهده گردید که مصرف فسفریک اسید در خاک موجب افزایش سرعت رشد گیاه در هر سه مرحله رشد در مقایسه با تیمار شاهد گردید اما تغییرات ایجاد شده از نظر آماری معنادار نبود.



شکل ۲ - اثر مصرف فسفریک اسید (درصد وزنی-وزنی) بر سرعت رشد گیاه ذرت در خاک لوم رسی در زمان‌های مختلف. در هر صفت، میانگین‌های دارای یک حرف لاتین مشترک با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنادار ندارند.

وزن تر و خشک بخش هوایی و ریشه

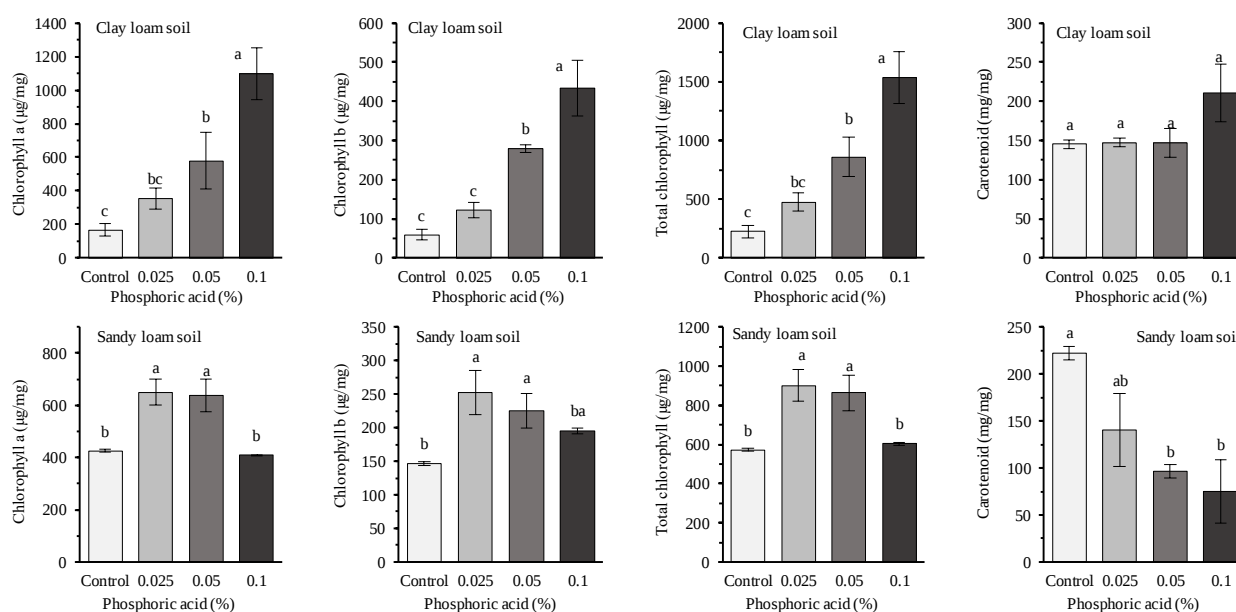
بر اساس نتایج تجزیه واریانس، در خاک لوم رسی تغییرات وزن تر و خشک بخش هوایی و ریشه تحت تأثیر فسفریک اسید معنادار بود (جدول ۲). همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، در خاک لوم رسی غلظت‌های ۰/۰۵ و ۰/۰۲۵ درصد فسفریک اسید موجب افزایش وزن تر (۶۱/۳-۶۹/۳ درصد) و خشک بخش هوایی (۲۶/۹-۵۵/۴ درصد) گیاه گردید در مقابل، غلظت ۰/۱ درصد فسفریک اسید وزن تر و خشک بخش هوایی را به ترتیب ۱۴/۴ و ۲۶/۳ درصد کاهش داد. در بخش ریشه نیز، بیشترین افزایش وزن تر و خشک در تیمار ۰/۰۵ درصد فسفریک اسید مشاهده گردید که در مقایسه با تیمار شاهد مقدار افزایش وزن تر و خشک به ترتیب ۳۰/۷ و ۳۰/۷ درصد بود. غلظت ۰/۱ درصد فسفریک اسید وزن تر ریشه را در مقایسه با تیمار شاهد ۴ درصد کاهش و وزن خشک ریشه را ۲/۱ درصد افزایش داد که مقدار افزایش از نظر آماری معنادار نبود. در خاک لوم شنی مصرف فسفریک اسید بر وزن تر و خشک بخش هوایی و همچنین وزن خشک ریشه معنادار نبود (جدول ۲) اما تغییرات وزن تر ریشه از نظر آزمون دانکن معنادار بود (جدول ۲). همچنین در خاک لوم شنی، بین غلظت‌های مختلف فسفریک اسید تفاوت معناداری مشاهده نگردید.



شکل ۳ - اثر مصرف فسفریک اسید (درصد وزنی-وزنی) بر وزن تر و خشک بخش هوایی و ریشه گیاه ذرت در خاک لوم رسی و لوم شنی. در هر صفت، میانگین‌های دارای یک حرف لاتین مشترک با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنادار ندارند.

غلظت کلروفیل و کارتنوئید برگ

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تغییرات غلظت کلروفیل a, b و کلروفیل کل تحت تأثیر مصرف فسفریک اسید در هر دو خاک لوم رسی و لوم شنی معنادار بود (جدول ۳). بررسی نتایج مقایسه میانگین نشان داد که در خاک لوم رسی با افزایش غلظت فسفریک اسید، غلظت کلروفیل a, b و کلروفیل کل، روند افزایشی داشت (شکل ۴) به طوری که در هر سه ویژگی مطالعه شده، بیشترین مقدار افزایش مربوط به تیمار ۰/۱ درصد فسفریک اسید بود. در خاک لوم شنی نیز مشاهده گردید که غلظت کلروفیل a, b و کلروفیل کل با مصرف فسفریک اسید در خاک در مقایسه با تیمار شاهد (بدون مصرف فسفریک اسید) افزایش یافت. در این خاک، بررسی غلظت کلروفیل a نشان داد که تیمارهای ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد فسفریک اسید غلظت کلروفیل a را افزایش دادند اما غلظت ۰/۱ درصد فسفریک اسید موجب کاهش غلظت کلروفیل a گردید که این مقدار کاهش در مقایسه با تیمار شاهد از نظر آماری معنادار نبود. برای کلروفیل b و کل نیز نتایج مشابهی مشاهده گردید. در خاک لوم رسی مصرف فسفریک اسید موجب افزایش مقدار کارتنوئید در برگ گیاه گردید که تغییرات ایجاد شده از نظر آماری معنادار نبود (جدول ۳). در مقابل، در خاک لوم شنی با افزایش غلظت فسفریک اسید در خاک، غلظت کارتنوئید در برگ کاهش یافت. به طوری که بیشترین مقدار کاهش در غلظت ۰/۱ درصد فسفریک اسید مشاهده گردید. در خاک لوم شنی تغییرات غلظت کارتنوئید تحت تأثیر فسفریک اسید معنادار بود (جدول ۳).



شکل ۴ - اثر مصرف فسفریک اسید (درصد وزنی-وزنی) بر غلظت کلروفیل و کارتنوئید برگ گیاه ذرت در خاک لوم رسی و لوم شنی. در هر صفت، میانگین‌های دارای یک حرف لاتین مشترک با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنادار ندارند.

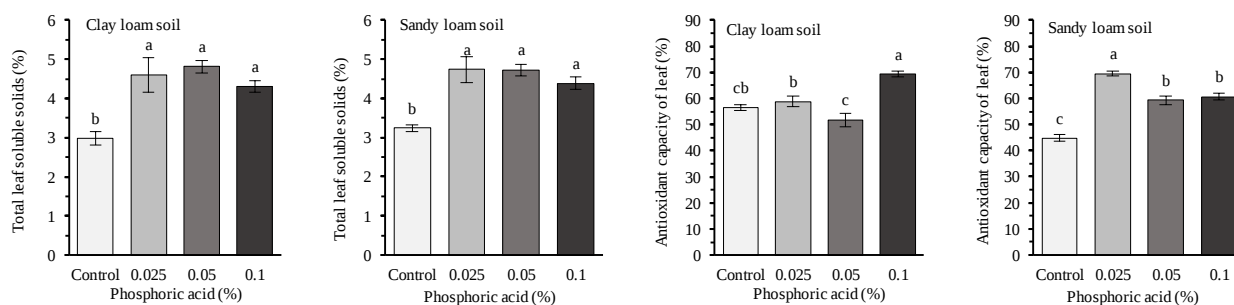
جدول ۳- تجزیه واریانس اثر مصرف فسفریک اسید در خاک بر غلظت کلروفیل، کارتنوئید و ظرفیت آنتی اکسیدانی گیاه ذرت.

منبع تغییر	درجه آزادی	کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل کل	کارتنوئید	مواد جامد محلول	ظرفیت آنتی اکسیدانی
میانگین مربعات							
خاک لوم رسی							
فسفریک اسید	۳	۴۸۹۲۵۱/۵**	۸۵۱۵۵/۶**	۹۷۶۰۰۵/۱**	۳۱۰۴/۹ ^{ns}	۲/۰۳۴۹**	۱۶۱/۵**
خطا	۸	۴۳۲۶۵/۲	۴۳۲۷/۹	۶۴۳۱۲/۳	۱۳۲۲/۹	۰/۲۰۶۴	۱۰/۳۲۶۵
ضریب تغییرات	-	۳۷/۸۴	۲۹/۴۰	۳۲/۷۹	۲۲/۳۸	۱۰/۸۸	۵/۴۳
خاک لوم شنی							
فسفریک اسید	۳	۵۱۸۲۷/۵**	۶۰۸۸/۲*	۸۷۹۷۲/۴**	۱۲۷۳۸/۹*	۱/۴۹۶۳**	۳۱۱/۶۷**
خطا	۸	۴۸۸۶/۴	۱۳۳۵/۲	۱۱۰۲۰/۷	۲۰۶۳/۴	۰/۱۲۲۳	۴/۸۳۲۷
ضریب تغییرات	-	۱۳/۱۸	۱۷/۸۴	۱۴/۲۸	۳۴/۰۲	۸/۱۸	۳/۷۵

^{ns}, *, ** به ترتیب غیرمعنادار و معنادار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

مواد جامد محلول و فعالیت آنتی اکسیدانی

بررسی مقدار مواد جامد محلول و همچنین فعالیت آنتی اکسیدانی در برگ گیاهان کشت شده در هر دو خاک لوم رسی و لوم شنی نشان داد که مصرف فسفریک اسید موجب ایجاد تغییرات معنادار در مقایسه با تیمار شاهد گردید (جدول ۳). با بررسی نتایج مقایسه میانگین برای مقدار مواد جامد محلول مشاهده گردید که در هر دو خاک، مقدار مواد جامد محلول تحت تأثیر مصرف فسفریک اسید افزایش یافت اما بین غلظت‌های مختلف فسفریک اسید از نظر آزمون دانکن تفاوت معناداری مشاهده نگردید (شکل ۵). همانطور که در شکل ۷ تغییرات فعالیت آنتی اکسیدانی نشان داده شده است، در خاک لوم رسی بیشترین فعالیت آنتی اکسیدانی در تیمار ۰/۱ درصد فسفریک اسید مشاهده گردید، در مقابل، در خاک لوم شنی، بیشترین مقدار مربوط به تیمار ۰/۰۲۵ درصد فسفریک اسید بود و بین تیمار ۰/۰۵ و ۰/۱ درصد فسفریک اسید تفاوت از نظر آماری معنادار نبود.



شکل ۵ - اثر مصرف فسفریک اسید (درصد وزنی-وزنی) بر غلظت مواد جامد محلول و فعالیت آنتی اکسیدانی گیاه ذرت در خاک لوم رسی و لوم شنی. در هر صفت، میانگین‌های دارای یک حرف لاتین مشترک با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنادار ندارند.

تأثیر فسفریک اسید بر غلظت برخی عناصر غذایی بخش هوایی و ریشه

غلظت فسفر

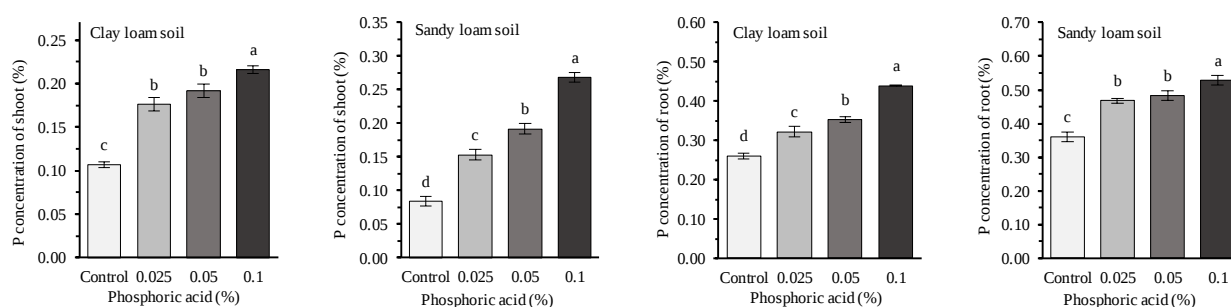
در شکل ۶ تغییرات غلظت فسفر در بخش هوایی و ریشه نشان داده شده است. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که مصرف سطوح مختلف فسفریک اسید تأثیر معناداری بر غلظت فسفر در بخش هوایی و ریشه گیاه ذرت در هر دو نوع خاک لوم رسی و لوم شنی داشت ($p < 0.01$) (جدول ۴). در هر دو خاک لوم رسی و لوم شنی، با افزایش غلظت فسفریک

اسید، غلظت فسفر در هر دو بخش هوایی و ریشه افزایش یافت (شکل ۶). بر اساس مقایسه بین تیمارهای فسفریک اسید و تیمار شاهد مشاهده شد که در خاک لوم رسی، بیشترین غلظت فسفر بخش هوایی (۰/۲۲ درصد) و ریشه (۰/۴۴ درصد) مربوط به تیمار ۰/۱ درصد فسفریک اسید بود که غلظت فسفر بخش هوایی و ریشه را در مقایسه با تیمار شاهد ۱۰۲/۱۹ و ۶۸/۴۱ درصد افزایش داد. در خاک لوم شنی نیز نتایج مشابهی به دست آمد، به طوری که در تیمار ۰/۱ درصد فسفریک اسید بیشترین غلظت فسفر بخش هوایی و ریشه به ترتیب برابر با ۰/۲۷ و ۰/۵۳ درصد بود که مقدار افزایش در مقایسه با تیمار شاهد به ترتیب ۲۱۸/۲ و ۴۶/۸ درصد بود. بین تیمار ۰/۲۵ و ۰/۰۵ درصد فسفریک اسید تفاوت معناداری از نظر آماری در فسفر بخش هوایی مربوط به خاک لوم رسی و غلظت فسفر در بخش ریشه خاک لوم شنی دیده نشد.

جدول ۴ - تجزیه واریانس اثر فسفریک اسید بر غلظت نیتروژن، فسفر و پتاسیم گیاه ذرت در خاک لوم رسی و لوم شنی.

منبع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات			
		فسفر		نیتروژن	
		بخش هوایی	ریشه	بخش هوایی	ریشه
پتاسیم					
بخش هوایی					
ریشه					
خاک لوم سی					
فسفریک اسید	۳	۰/۰۰۶۶**	۰/۰۱۶۵**	۰/۱۹**	۰/۳۲**
خطا	۸	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۲	۰/۰۱۱	۰/۰۰۲
ضریب تغییرات	-	۶/۰۹	۴/۳۳	۱/۷۵	۰/۹۶
خاک لوم شنی					
فسفریک اسید	۳	۰/۰۱۷۷**	۰/۰۱۵۳**	۰/۲۴**	۰/۲۶**
خطا	۸	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۵	۰/۰۱۱۵	۰/۰۰۲
ضریب تغییرات	-	۷/۶۱	۴/۷۹	۱/۸۴	۰/۸۷

ns, *, ** به ترتیب غیرمعنادار و معنادار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

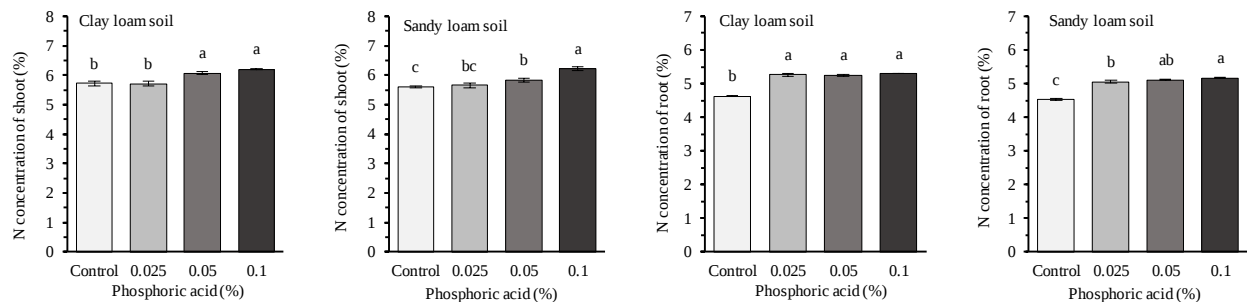


شکل ۶ - اثر مصرف فسفریک اسید (درصد وزنی-وزنی) بر غلظت فسفر بخش هوایی و ریشه گیاه ذرت در خاک لوم رسی و لوم شنی. در هر صفت، میانگین‌های دارای یک حرف لاتین مشترک با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنادار ندارند.

غلظت نیتروژن

بر اساس نتایج تجزیه واریانس اثر مصرف فسفریک اسید در خاک بر غلظت نیتروژن بخش هوایی و ریشه در هر دو خاک لوم رسی و لوم شنی معنادار بود ($p < 0.01$) (جدول ۴). در هر دو خاک، مصرف فسفریک اسید موجب افزایش غلظت نیتروژن در بخش هوایی و ریشه گیاه شد. در خاک لوم رسی بررسی نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بیشترین غلظت نیتروژن در بخش هوایی (۶/۲ درصد) و ریشه (۵/۳ درصد)، در مقایسه با تیمار شاهد، مربوط به تیمار ۰/۱ درصد فسفریک اسید بود که مقدار افزایش در مقایسه با تیمار شاهد به ترتیب برابر با ۸/۴ و ۱۴/۶ درصد بود (شکل ۷). در بخش هوایی، بین تیمار شاهد و ۰/۲۵ درصد فسفریک اسید و همچنین بین تیمارهای ۰/۰۵ و ۰/۱ درصد تفاوت از نظر آماری

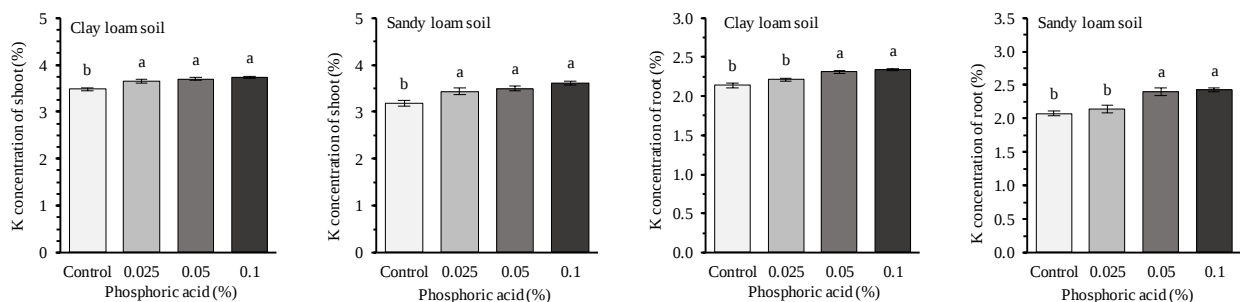
معنادار نبود. در بخش ریشه نیز، بین سه غلظت فسفریک اسید از نظر آماری تفاوت معنادار نبود. در خاک لوم شنی نیز روند مشابهی مشاهده شد. به طوری که، بیشترین غلظت نیتروژن بخش هوایی (۶/۲۲ درصد) و ریشه (۵/۱۷ درصد) در تیمار ۰/۱ درصد فسفریک اسید بود که مقدار افزایش در مقایسه با تیمار شاهد به ترتیب برابر با ۱۱/۱ و ۱۴/۲ درصد بود (شکل ۷). در بخش ریشه، بین تیمار ۰/۵ و ۰/۱ درصد تفاوت آماری وجود نداشت.



شکل ۷ - اثر مصرف فسفریک اسید (درصد وزنی-وزنی) بر غلظت نیتروژن بخش هوایی و ریشه گیاه ذرت در خاک لوم رسی و لوم شنی. در هر صفت، میانگین‌های دارای یک حرف لاتین مشترک با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنادار ندارند.

غلظت پتاسیم

همانطور که تجزیه واریانس نشان داد، مصرف فسفریک اسید غلظت پتاسیم بخش هوایی و ریشه گیاه را در خاک لوم رسی و لوم شنی افزایش داد و این افزایش از نظر آماری معنادار بود ($p < 0.01$) (جدول ۴). بر اساس نتایج مقایسه میانگین مشاهده شد که در خاک لوم رسی و لوم شنی، با افزایش غلظت فسفریک اسید در خاک، غلظت پتاسیم بخش هوایی و ریشه روند افزایشی داشت (شکل ۸). در خاک لوم رسی و لوم شنی، بیشترین غلظت پتاسیم بخش هوایی و ریشه در تیمار ۰/۱ درصد فسفریک اسید مشاهده شد. مقدار افزایش پتاسیم بخش هوایی در مقایسه با تیمار شاهد به ترتیب برابر با ۷/۱۸ و ۱۳/۶۱ بود. در بخش ریشه نیز مقدار افزایش پتاسیم در خاک لوم رسی و لوم شنی به ترتیب برابر با ۱۴/۶ و ۱۴/۲۱ درصد بود. در خاک لوم رسی، تغییرات پتاسیم بخش هوایی بین تیمارهای فسفریک اسید از نظر آماری معنادار نبود. در بخش ریشه نیز نتایج مشابهی از نظر آماری بین تیمار شاهد و ۰/۲۵ درصد و همچنین بین ۰/۵ و ۰/۱ درصد مشاهده شد. در خاک لوم شنی نیز تغییرات آماری در بخش ریشه و بخش هوایی مشابه با خاک لوم رسی بود.



شکل ۸ - اثر مصرف فسفریک اسید (درصد وزنی-وزنی) بر غلظت پتاسیم بخش هوایی و ریشه گیاه ذرت در خاک لوم رسی و لوم شنی. در هر صفت، میانگین‌های دارای یک حرف لاتین مشترک با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنادار ندارند.

تأثیر فسفریک اسید بر pH و EC خاک

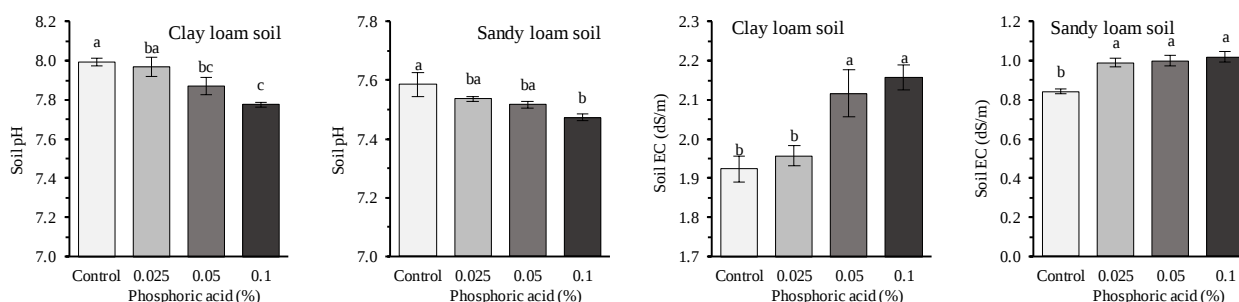
بر اساس نتایج تجزیه واریانس تأثیر فسفریک اسید بر pH و قابلیت هدایت الکتریکی خاک (EC) معنادار بود (جدول ۵). در شکل ۸ نتایج مقایسه میانگین اثر مصرف فسفریک اسید بر pH و هدایت الکتریکی خاک نشان داده شده است. در خاک

لوم رسی، مقادیر ۰/۰۲۵، ۰/۰۵ و ۰/۱ درصد فسفریک اسید مقدار pH خاک را در مقایسه با تیمار شاهد، به ترتیب ۰/۳۳، ۱/۵۴ و ۲/۷۳ درصد کاهش داد. تفاوت بین تیمارهای ۰/۰۲۵ و ۰/۰۵ و همچنین ۰/۰۵ و ۰/۱ از نظر آماری معنادار نبود. در خاک لوم شنی نیز، تیمار ۰/۰۲۵، ۰/۰۵ و ۰/۱ درصد فسفریک اسید مقدار pH خاک را در مقایسه با تیمار شاهد، به ترتیب ۰/۶۶، ۰/۹۲ و ۱/۴۹ درصد کاهش داد. مصرف فسفریک اسید در هر دو خاک میزان هدایت الکتریکی خاک را افزایش داد به طوری که در خاک لوم رسی و در مقایسه با تیمار شاهد، بیشترین مقدار افزایش (۱۲/۱۳ درصد) در تیمار ۰/۱ درصد فسفریک اسید مشاهده شد و در خاک لوم شنی نیز، بیشترین مقدار افزایش (۲۰/۹۵ درصد) مربوط به تیمار ۰/۱ درصد فسفریک اسید بود.

جدول ۵ تجزیه واریانس اثر فسفریک اسید بر pH و EC خاک در خاک لوم رسی و لوم شنی.

منبع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات			
		خاک لوم سی		خاک لوم شنی	
		pH	EC	pH	EC
فسفریک اسید	۳	۰/۰۳۰**	۰/۰۴۰**	۰/۰۰۷*	۰/۰۲۰**
خطا	۸	۰/۰۰۴	۰/۰۰۵	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲
ضریب تغییرات	—	۰/۷۸	۳/۴۳	۰/۵۲	۴/۲۶

ns، *، ** به ترتیب غیرمعنادار و معنادار در سطح احتمال پنج و یک درصد.



شکل ۹ - اثر مصرف فسفریک اسید (درصد وزنی-وزنی) بر pH و EC دو خاک مختلف. در هر صفت، میانگین‌های دارای یک حرف لاتین مشترک با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنادار ندارند.

بحث

خاک‌های آهکی عموماً pH بالایی دارند که در این شرایط کمبود اغلب عناصر ضروری برای رشد گیاه مشاهده می‌شود. محدودیت‌های اصلی بهره‌وری محصول در این خاک‌ها عموماً کمبود عناصر غذایی مانند فسفر است (Bolan et al., 2023). بررسی‌ها نشان داده است که فراهمی زیستی فسفر برای گیاهان ارتباط تنگاتنگی با pH خاک دارد (Davies & Lacey, 2011) و بیشترین میزان جذب فسفر برای گیاهانی مانند ذرت می‌تواند در pH محدوده ۶/۵-۷ باشد (Penn & Camberato, 2019). زمانی که مقادیر pH خاک بالاتر از محدوده مذکور باشد (مانند خاک‌های آهکی)، می‌تواند موجب کاهش فراهمی فسفر برای گیاهان شود. (Bolan et al., 2023) بیان کردند که ویژگی‌های خاک، از جمله pH و بافت خاک، پویایی و سرنوشت فسفر و برخی عناصر دیگر را در خاک‌های آهکی کنترل می‌کند. همچنین، ویژگی‌های خاک از قبیل مقدار رس، کربن آلی خاک، pH، بافت خاک و غلظت سایر عناصر از قبیل آهن، آلومینیم و کلسیم در خاک‌های آهکی می‌توانند بر جذب عناصری مانند فسفر تأثیر بگذارند (Hedley & McLaughlin, 2005).

نتایج به دست آمده نشان داد که در هر دو خاک لوم رسی و لوم شنی، مقادیر ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در گیاهان تیمار شاهد (در شرایط عدم مصرف فسفریک اسید در خاک) کمتر از تیمار فسفریک اسید بود. احتمالاً یکی از دلایل اصلی این موضوع، بالا بودن pH خاک است. زیرا همان‌طور که گفته شد، افزایش pH می‌تواند حل‌پذیری عناصر غذایی کم‌مصرف را کاهش داده و در نتیجه منجر به کمبود این عناصر در گیاه شود (FAO, 2020) و در نهایت منجر به کاهش رشد و عملکرد در گیاه شود. در مقابل، تیمار فسفریک اسید به ویژه در غلظت‌های ۰/۰۵ و ۰/۰۲۵ در صد، تأثیر مثبتی بر اغلب ویژگی‌های اندازه‌گیری شده مانند ارتفاع بوته، سرعت رشد، وزن بخش هوایی و غلظت کلروفیل برگ‌ها داشت. بررسی‌ها نشان داده است که مصرف فسفریک اسید می‌تواند عملکرد و رشد گیاهان مختلف را افزایش دهد (Rengrudkij & Partida, 2016; Hashmi et al., 2017; Etemadian et al., 2018; Bayat et al., 2025) (2003) نیز افزایش قطر و ارتفاع گیاه تحت تأثیر مصرف فسفریک اسید را گزارش و بیان کردند که فسفریک اسید می‌تواند موجب تحریک رشد، وزن خشک گیاه، جذب نیتروژن و فسفر گیاه شود. در واقع، فسفریک اسید با کاهش pH موضعی در اطراف ریشه، انحلال ترکیبات کم‌تحرک فسفات کلسیم را افزایش می‌دهد و موجب آزادسازی فسفر تثبیت‌شده در خاک‌های آهکی می‌شود (Bolan et al., 2023) که در نتیجه آن، فسفر به فرم قابل جذب در اختیار ریشه گیاه قرار می‌گیرد و افزایش جذب آن توسط گیاه، رشد و وزن خشک را بهبود می‌بخشد.

همچنین، نتایج بررسی ما نشان داد که غلظت پتاسیم گیاه تحت تأثیر مصرف فسفریک اسید افزایش یافت که احتمالاً به دلیل افزایش فراهمی پتاسیم در محلول خاک در اثر کاهش موضعی pH باشد. کاهش pH خاک منجر به افزایش حل‌پذیری ترکیبات پتاسیم و مواد معدنی حاوی پتاسیم می‌شود (Bader et al., 2021)، که در نتیجه آن، پتاسیم قابل دسترس برای گیاه افزایش می‌یابد. همان‌طور که مطالعات نشان داده است، با افزایش pH، بار منفی ذرات خاک افزایش می‌یابد، که به معنای کاهش نسبت کاتیون‌های موجود در فاز محلول است و در نتیجه نرخ حرکت آن‌ها به سمت ریشه‌های گیاه از طریق انتشار کاهش می‌یابد (Maathuis & Sanders, 1996). بنابراین، یکی از دلایل احتمالی تأثیر مثبت فسفریک اسید بر رشد گیاه می‌تواند کاهش موضعی pH خاک در ناحیه رشد ریشه و فراهمی بیشتر عناصر مورد نیاز برای رشد گیاه باشد. در واقع، pH خاک که به عنوان «متغیر اصلی» شیمی خاک در نظر گرفته می‌شود، به دلیل تأثیر عمیق آن بر واکنش‌های شیمیایی بی‌شماری که شامل عناصر غذایی ضروری گیاهان است (Penn & Camberto, 2019)، استفاده از فسفریک اسید می‌تواند بر pH خاک اثر گذار بوده و باعث کاهش آن شود. گزارش شده است که کاهش pH خاک در اثر مصرف فسفریک اسید باعث افزایش فراهمی و جذب عناصر معدنی توسط گیاه شده و در نتیجه، رشد رویشی بهبود می‌یابد (Mohamed, 2021).

Hussain et al. (2011) نیز بیان کردند که در این شرایط جذب سایر عناصر غذایی از جمله عناصر پرمصرف و کم‌مصرف توسط گیاه افزایش یافته و در نهایت زیست‌توده اندام‌های هوایی افزایش می‌یابد. دلیل دیگر احتمالاً مربوط به افزایش فسفر محلول به واسطه استفاده از فسفریک اسید در خاک باشد که در نتیجه آن فسفر بیشتری به فرم قابل جذب در اختیار ریشه گیاه قرار گرفته و و در پی آن، توسعه و رشد گیاه افزایش یابد. (McBeath et al., 2007) گزارش دادند که استفاده از فسفر مایع مانند فسفریک اسید کارایی بالاتری در مقایسه با اشکال دانه‌ای فسفر مانند دی‌آمونیم فسفات و مونو آمونیوم فسفات دارد که دلیل آن را مربوط به افزایش فراهمی فسفر برای جذب توسط گیاه بیان کردند.

در پژوهش حاضر مشاهده شد که مصرف فسفریک اسید موجب افزایش غلظت فسفر و پتاسیم در اندام‌های گیاه شد که بیانگر بهبود جذب عناصر غذایی در نتیجه تیمار است که با نتایج Bayat et al. (2025) مطابقت داشت. در همین راستا، Ehiagiator et al. (2011) نیز گزارش کردند که افزایش مصرف فسفر می‌تواند سطح عناصر غذایی را در گیاهان افزایش داده و به بهبود تغذیه گیاه کمک کند. Ehiagiator et al. (2011) پیشنهاد دادند که افزایش مصرف فسفر می‌تواند سطح عناصر غذایی را در گیاهان افزایش دهد و می‌تواند به بهبود جذب عناصر غذایی کمک نماید. بنابراین، افزایش توانایی جذب فسفر و عناصری مانند نیتروژن و پتاسیم می‌تواند موجب افزایش فتوسنتز در گیاه شده و در نتیجه

آن رشد گیاه افزایش پیدا کند (Yusuf et al., 2017). به این دلیل که نیتروژن، فسفر و پتاسیم از عناصر ضروری برای رشد و نمو گیاهان هستند، ضمن این‌که، نیتروژن بیشترین تأثیر را بر رشد و نمو گیاه دارد و پس از آن فسفر و پتاسیم قرار دارند (Jiaying et al., 2022). (Motalebifard et al. (2014). بهبود رشد گیاهان سیب زمینی را با مصرف کود فسفر مشاهده کردند. (Yazdani Motlag et al. (2014). گزارش کردند که با مصرف کود فسفر رشد گیاهان برنج بهبود یافت. بهبود ویژگی‌های رشد گیاهان یونجه به وسیله (Markarian et al. (2016). گزارش شد. (Azimzadeh et al. (2020). افزایش رشد گیاه ذرت با مصرف کود فسفر را گزارش کردند. (Salimi Trazoj et al. (2024). مصرف کود فسفر سبب افزایش ماده خشک اندام‌های هوایی گیاهان کلزا شد. (Shafighi et al. (2025). گزارش کردند که مصرف فسفر سبب افزایش طول و عرض برگ‌ها، وزن هزار دانه و عملکرد زیستی گیاهان گندم شد.

از دلایل دیگر اثر فسفریک اسید بر رشد گیاه احتمالاً مربوط به تأثیر آن بر برخی ویژگی‌های خاک باشد. هنگامی که فسفریک اسید به خاک آهکی اضافه می‌شود، برخی ویژگی‌های خاک تحت تأثیر مصرف فسفریک اسید تغییر پیدا می‌کند (Ameen et al., 2019). اگرچه در این مطالعه از خاک دست‌خورده در شرایط گلدانی استفاده شد اما بر اساس گزارش (Ameen et al. (2019)، فسفریک اسید می‌تواند از طریق اصلاح توزیع کاتیون‌ها، ویژگی‌های فیزیکی خاک را بهبود دهد. همچنین، (McBeath et al. (2007). نشان دادند که مصرف فسفریک اسید ممکن است با افزایش فعالیت میکروبی، به بهبود چرخه عناصر غذایی کمک کند. با توجه به محدودیت‌های محیط گلدانی، این سازوکارها در این پژوهش به صورت مستقیم ارزیابی نشده‌اند اما می‌توانند به عنوان فرضیاتی برای تفسیر نتایج در نظر گرفته شوند.

با وجود اینکه مصرف فسفریک اسید می‌تواند اثرات مثبتی بر گیاه داشته باشد اما مشاهده گردید که در برخی صفات مطالعه شده در گیاه میزان افزایش در تیمار ۰/۱ در صد فسفریک اسید در مقایسه با تیمارهای ۰/۰۵ و ۰/۰۲۵ در صد، کمتر بود و در مواردی مانند وزن تر و خشک بخش هوایی حتی موجب کاهش در مقایسه با تیمار شاهد گردید، که ممکن است به دلیل بروز سمیت برای گیاه و یا بروز کمبود برخی عناصر مورد نیاز گیاه در حضور مقادیر بالای فسفر باشد. در واقع، کمبود برخی عناصر غذایی کم مصرف در گیاهان می‌تواند مانع فتوسنتز، جوانه‌زنی بذر و بیوسنتز کلروفیل شود (Saleem et al., 2023). به عنوان مثال، کمبود عنصر منگنز در گیاهان می‌تواند منجر به کاهش زیست توده شود (Hebber et al., 2005)، یا اینکه برای تولید کلروفیل و حفظ ساختار و عملکرد کلروپلاست عناصری مانند آهن مورد نیاز است (Saleem et al., 2023) و کاهش کلروفیل، کلروپلاست و همچنین بازده خالص فتوسنتز را می‌توان به کمبود این قبیل عناصر نسبت داد (Alejandro et al., 2017). (Bayat et al. (2025). گزارش کردند که با مصرف فسفریک اسید غلظت کلروفیل برگ‌های گوجه فرنگی افزایش یافت.

(Luo et al (2022) نشان دادند که عرضه بیش از حد عناصری مانند فسفر در گیاه پنبه موجب محدود شدن رشد آن گردید و به طور قابل توجهی بر پارامترهای فتوسنتزی و عملکرد گیاه تأثیر گذاشت. (Aboyeji et al. (2020). نیز بیان کردند زمانی که فسفر در مقادیر بیشتر در خاک مورد استفاده قرار گیرد، ممکن است باعث جذب کندتر عنصر روی توسط گیاهان یا ناکافی شدن غلظت آن در خاک شود و این فرآیند می‌تواند منجر به کاهش عملکرد در بسیاری از محصولات شود. بنابراین، یکی از دلایل اثر منفی غلظت بالای فسفریک اسید (۰/۱ درصد) بر رشد گیاه می‌تواند مربوط به اثر منفی فسفر بر جذب سایر عناصر غذایی مانند روی، آهن، منگنز در خاک باشد.

نکته حائز اهمیت دیگر مربوط به اثر فسفریک اسید بر رشد گیاه در خاک‌هایی با بافت متفاوت است. همانطور که گزارش گردید تأثیر فسفریک اسید بر رشد گیاه در خاک لوم رسی، در مقایسه با خاک لوم شنی، بیشتر بود. این تفاوت احتمالاً مربوط به ظرفیت بالاتر خاک لوم رسی در نگهداری عناصر غذایی باشد. حضور میزان بیشتری رس در این خاک، منجر به افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی شده و در نتیجه، قابلیت نگهداری و آزادسازی تدریجی عناصر غذایی را بهبود بخشیده است. این امر موجب فراهم‌سازی شرایط مطلوب‌تر برای جذب فسفر توسط گیاه در طول دوره رشد شده است. علاوه بر این، احتمال می‌رود که در خاک لوم رسی، اثرات منفی ناشی از غلظت‌های بالای فسفریک اسید بر رشد گیاه، در

مقایسه با خاک لوم شنی، تعدیل شده باشد. این نتیجه می‌تواند به دلیل کاهش اثرات منفی ناشی از کاهش شدید pH تحت تأثیر مقادیر بالای فسفریک اسید در این نوع خاک باشد. به عنوان مثال، مشاهده شد که در خاک لوم رسی غلظت کلروفیل افزایش یافته، در حالی که مقدار کاروتنوئید تغییر معناداری نداشته است.

در واقع کاروتنوئیدها علاوه بر اینکه در فتوسنتز و انتقال انرژی به مرکز واکنش نقش ایفا می‌کنند و در تیلاکوئیدها حضور دارند (کاروتنوئیدهای اولیه)، نوع دیگری از آنها نیز وجود دارند که نقش آنتی‌اکسیدانی داشته و بر خلاف نوع اولیه نقشی در فتوسنتز و انتقال انرژی در برگ ندارند و در خارج از تیلاکوئید قرار دارند و به طور معمول در شرایط خاص تنش‌های محیطی تجمع می‌یابد (Maslova et al., 2021). بنابراین، این احتمال وجود دارد که اثر منفی غلظت بالای فسفریک اسید در خاک لوم رسی تعدیل شده باشد و با وجود اینکه در این خاک کاروتنوئید گیاه افزایش یافته است اما میزان این افزایش از نظر آماری معنادار نبوده است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش مشاهده گردید که غلظت‌های کمتر فسفریک اسید (۰/۰۲۵ و ۰/۰۵ در صد) تأثیر مثبتی بر سرعت رشد، وزن تر و خشک گیاه و غلظت کلروفیل داشته‌اند. همچنین، برخی ویژگی‌های فیزیولوژیکی از قبیل کلروفیل، مواد جامد محلول و فعالیت آنتی‌اکسیدانی نیز در برگ گیاه افزایش یافت. در مقابل، غلظت بالاتر (۰/۱ در صد) احتمالاً به دلیل کاهش شدیدتر pH و یا تجمع بیش از حد فسفر، منجر به اثرات منفی از جمله کاهش وزن تر و خشک بخش هوایی و کاهش غلظت کلروفیل گردید. به طور کلی، مصرف فسفریک اسید در خاک رشد گیاه ذرت را در هر دو نوع خاک لوم رسی و لوم شنی بهبود بخشید. ضمن این‌که، تأثیر فسفریک اسید در خاک با بافت لوم رسی بیشتر از لوم شنی بود. با توجه به اینکه در این پژوهش تأثیر فسفریک اسید بر ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی خاک (به استثنای pH و هدایت الکتریکی) به صورت مستقیم بررسی نشده است، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، این جنبه به طور دقیق ارزیابی شود تا سازوکار اثرگذاری فسفریک اسید بر رشد گیاه و فراهمی عناصر غذایی در خاک‌های با بافت‌های مختلف بهتر روشن گردد. آن‌جا که این آزمایش در یک دوره رشد کوتاه مدت و در شرایط گلخانه‌ای انجام شده، توصیه می‌شود که پژوهش‌های آتی در دوره‌های بلندمدت و در شرایط مزرعه‌ای طراحی و اجرا شوند تا قابلیت تعمیم نتایج افزایش یابد. همچنین، برای درک جامع‌تر از تأثیر فسفریک اسید بر رشد و عملکرد گیاه، لازم است در تحقیقات بعدی، برخی شاخص‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی مانند فعالیت آنزیم‌های مرتبط با تغذیه گیاه و تحمل تنش‌ها نیز بررسی شوند.

منابع مورد استفاده

References

- Aboyeji, C. M., Dunsin, O., Adekiya, A. O., Suleiman, K. O., Chinedum, C., Okunlola, F. O., & Owolabi, I. O. (2020). Synergistic and antagonistic effects of soil applied P and Zn fertilizers on the performance, minerals and heavy metal composition of groundnut. *Open Agriculture*, 5(1), 1–9.
<https://doi.org/10.1515/opag-2020-0001>
- Akhtar, M., Yaqub, M., Naeem, A., Ashraf, M., & Hernandez, V. E. (2016). Improving phosphorus uptake and wheat productivity by phosphoric acid application in alkaline calcareous soils. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96(11), 3701–3707.
<https://doi.org/10.1002/jsfa.7555>
- Akpınar-Bayazit, A., Özcan, T., Yılmaz-Ersan, L., & Yıldız, E. (2016). Evaluation of antioxidant activity of pomegranate molasses by 2, 2-Diphenyl-1-Picrylhydrazyl (DPPH) method. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, 7(1), 71–74.
<http://10.7763/IJCEA.2016.V7.545>

- Alejandro, S., Cailliatte, R., Alcon, C., Dirick, L., Domergue, F., Correia, D., & Curie, C. (2017). Intracellular distribution of manganese by the trans-Golgi network transporter NRAMP2 is critical for photosynthesis and cellular redox homeostasis. *The Plant Cell*, 29(12), 3068–3084.
<https://doi.org/10.1105/tpc.17.00578>
- Ameen, M., Akhtar, J., Sabir, M., & Ahmad, R. (2019). Effect of phosphoric acid and potassium humate on growth and yield of maize in saline-sodic soil. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 56(4), 897–904.
<http://dx.doi.org/10.21162/PAKJAS/19.8151>
- Arnon, A. N. 1967. Method of extraction of chlorophyll in the plants. *Agronomy Journal*, 23:112-121.
- Azimzadeh, Y., Najafi, N., Reyhanitabar, A., Oustan, S., & Khataee, A. (2020). Effects of phosphate loaded LDH-biochar/hydrochar on maize dry matter and P uptake in a calcareous soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 67(12), 1649–1664.
<https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1802012>
- Bayat, M., Hassani, A. & Nourzadeh Hadad, M. (2025). Improving the characteristics of tomato seedlings by integrated application of humic acid, auxin, and phosphoric acid. *Journal of Soil and Plant Science*, 35(1), 51–65.
<https://doi.org/10.22034/sps.2025.66358.1003>
- Bader, B. R., Taban, S. K., Fahmi, A. H., Abood, M. A., & Hamdi, G. J. (2021). Potassium availability in soil amended with organic matter and phosphorous fertiliser under water stress during maize (*Zea mays* L.) growth. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 20(6), 390-394.
<https://doi.org/10.1016/j.jssas.2021.04.006>
- Bertrand, I., McLaughlin, M. J., Holloway, R. E., Armstrong, R. D., & McBeath, T. (2006). Changes in P bioavailability induced by the application of liquid and powder sources of P, N and Zn fertilizers in alkaline soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 74(1), 27–40.
<https://doi.org/10.1007/s10705-005-4404-3>
- Bolan, N., Srivastava, P., Rao, C. S., Satyanaraya, P. V., Anderson, G. C., Bolan, S., ... & Kirkham, M. B. (2023). Distribution, characteristics and management of calcareous soils. *Advances in Agronomy*, 181, 81–130.
<https://doi.org/10.1016/bs.agron.2023.06.002>
- Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agronomy Journal*, 54(5), 464–465.
<https://doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x>
- Bremner, J. M. (1996). Nitrogen-total. Pp. 1085–1121. In: D. L. Sparks, A. L. Page, P. A. Helmke, R. H. Loeppert, P. N. Soltanpour, M. A. Tabatabai, G. T. Johnston, & M. E. Sumner (Eds.), *Methods of soil analysis: Part 3—Chemical methods*. Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, WI, USA.
- Brownrigg, S., McLaughlin, M. J., McBeath, T., & Vadakattu, G. (2022). Effect of acidifying amendments on P availability in calcareous soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 124(2), 247–262.
<https://doi.org/10.1007/s10705-022-10241-1>
- Chakraborty, D., & Prasad, R. (2019). Phosphorus basics: Deficiency symptoms, sufficiency ranges, and common sources. *Crop Production*, 1, 1–4.
- Davies, S., & Lacey, A. (2011). Subsurface compaction: A guide for WA farmers and consultants. *Bulletin 4818*. Department of Primary Industries and Regional Development, Western Australia.
- Ehiagiator, J. O., Ariyo, A. D., & Imasuen, E. E. (2011). Soil fertility and nutritional studies on citrus, fruit and vegetable crops in Nigeria. Pp. 24–29. In: *Proceedings of the 29th Annual National Conference of Horticultural Society of Nigeria*, Kano, Nigeria.
- Etemadian, M., Hassani, A., Nourzadeh Haddad, M., & Hanifei, M. (2018). Effect of organic and inorganic acids on the release of nutrients in calcareous soils. *Journal of Water and Soil Conservation*, 24(5), 73–91. (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22069/jwsc.2017.12528.2723>
- FAO. (2020). Management of calcareous soils. FAO Soils Portal. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-management/management-of-some-problem-soils/en/>

- Hashmi, Z. U. H., Khan, M. J., Akhtar, M., Sarwar, T., & Khan, M. J. (2017). Enhancing phosphorus uptake and yield of wheat with phosphoric acid application in calcareous soil. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(6), 1733–1739.
<https://doi.org/10.1002/jsfa.7921>
- Hebbern, C. A., Pedas, P., Schjoerring, J. K., Knudsen, L., & Husted, S. (2005). Genotypic differences in manganese efficiency: Field experiments with winter barley (*Hordeum vulgare* L.). *Plant and Soil*, 272(1), 233–244.
<https://doi.org/10.1007/s11104-004-5048-9>
- Hedley, M., & McLaughlin, M. (2005). Reactions of phosphate fertilizers and by-products in soils. In *Phosphorus: Agriculture and the environment* (pp. 181–252). American Society of Agronomy.
<https://doi.org/10.2134/agronmonogr46.c7>
- Hopkins, B. G., & Ellsworth, J. W. (2005). Phosphorus management in high-yield systems. Pp. 88–94. In: *Western Nutrient Management Conference*. Salt Lake City, UT, USA.
- Huang, P. T., Patel, M., Santagata, M. C., & Bobet, A. (2009). Classification of organic soils.
- Hussain, F., Akhtar, M., Ashraf, M. Y., Qureshi, T. M., Anwar-ul-Haq, M., & Naeem, A. (2011). Evaluation of phosphoric acid as a phosphate fertilizer for wheat production on salt-affected soils. *Agrochimica*, 55(4), 203–211.
<https://doi.org/10.1002/jsfa.7921>
- Jiaying, M. A., Tingting, C., Jie, L., Weimeng, F., Baohua, F., Guangyan, L., and Guanfu, F. (2022). Functions of nitrogen, phosphorus and potassium in energy status and their influences on rice growth and development. *Rice Science*, 29(2), 166–178.
<https://doi.org/10.1016/j.rsci.2022.01.005>
- Leifheit, E. F., Kissener, H. L., Faltin, E., Ryo, M., & 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.
<https://doi.org/10.1007/s42832-022-0099-5>
- 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.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x>
- Loeppert, R. H., & Suarez, D. L. (1996). Carbonate and gypsum. Pp. 437–474. In: D. L. Sparks (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 3—Chemical methods*. Soil Science Society of America, WI, USA..
- Lombi, E., McLaughlin, M. J., Johnston, C., Armstrong, R. D., & Holloway, R. E. (2004). Mobility and lability of phosphorus from granular and fluid monoammonium phosphate differs in a calcareous soil. *Soil Science Society of America Journal*, 68(2), 682–689.
<https://doi.org/10.2136/sssaj2004.6820>
- Luo, T., Lu, W., Chen, L., Min, T., Ru, S., Wei, C., & Li, J. (2022). The effects of acidic compost tea on activation of phosphorus, Fe, Zn, and Mn in calcareous soil and cotton (*Gossypium hirsutum* L.) growth in Xinjiang, China. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22(3), 3822–3834.
<https://doi.org/10.1007/s42729-022-00909-9>
- Maathuis, F. J., and Sanders, D. (1996). Mechanisms of potassium absorption by higher plant roots. *Physiologia Plantarum*, 96(1), 158–168.
<https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1996.tb00197.x>
- Markarian, S., Najafi, N., Aliasgharzad, N., & Oustan, S. (2016). Interactive effects of *Ensifer meliloti* (*Sinorhizobium meliloti*) and phosphorus on some growth characteristics of alfalfa under soil water deficit conditions. *Journal of Soil Biology*, 3(2), 163–178. (in Persian with English abstract)
<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23452536.1394.3.2.7.9>
- Marschner, H., & Römheld, V. (1995). Strategies of plants for acquisition of iron. *Plant and Soil*, 165(2), 261–274.
<https://doi.org/10.1007/BF00008069>
- Maslova, T. G., Markovskaya, E. F., & Slemnev, N. N. (2021). Functions of carotenoids in leaves of higher plants. *Biology Bulletin Reviews*, 11(5), 476–487.
<https://doi.org/10.1134/S2079086421050069>

- McBeath, T. M., McLaughlin, M. J., Armstrong, R. D., Bell, M., Bolland, M. D. A., Conyers, M. K., Holloway, R. E., & Mason, S. D. (2007). Predicting the response of wheat (*Triticum aestivum* L.) to liquid and granular phosphorus fertilisers in Australian soils. *Soil Research*, 45(6), 448–458.
<https://doi.org/10.1071/SR07044>
- Mohamed, M. H. M. (2021). Implications of applied P-sources with calcium super phosphate, phosphoric acid and rock phosphate, and phosphate dissolving bacteria on snap bean grown under greenhouses conditions. *Annals of Agricultural Science, Moshtohor*, 59(5), 697–710.
<https://doi.org/10.21608/assjm.2021.195424>
- Motalebifard R., Najafi N., Oustan S., Nyshabouri M.R., & Valizadeh M. (2014). Effects of soil moisture, phosphorus and zinc levels on the growth attributes of potato in greenhouse conditions. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 45(1), 75–86. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22059/ijswr.2014.51173>
- Olsen, S. R., & Sommers, L. E. (1982). Phosphorus. Pp. 403–430. In: A. L. Page (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 2—Chemical and microbiological properties*. SSSA, American Society of Agronomy, WI, USA.
- 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.
- Penn, C. J., & Camberato, J. J. (2019). A critical review on soil chemical processes that control how soil pH affects phosphorus availability to plants. *Agriculture*, 9(6), 120.
<https://doi.org/10.3390/agriculture9060120>
- Pratt, P. F., & Chapman, H. D. (1961). Gains and losses of mineral elements in an irrigated soil during a 20-year lysimeter investigation. *Soil Science Society of America Journal*, 25(3), 194–198.
- Rengrudkij, P., & Partida, G. J. (2003). The effects of humic acid and phosphoric acid on grafted Hass avocado on Mexican seedling rootstocks. In *Proceedings of the World Avocado Congress* (pp. 395–400).
- Rhoades, J. D., Manteghi, N. A., Shouse, P. J., & Alves, W. J. (1989). Estimating soil salinity from saturated soil-paste electrical conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 53(2), 428–433.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1989.03615995005300020019x>
- 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. Pp. 23–49. In: *Sustainable plant nutrition*. Academic Press.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18675-2.00009-2>
- Salimi Trazoj, S., Reyhanitabar, A. & Najafi, N. (2024). Effects of biochar and phosphorus on dry matter and uptake of calcium, magnesium, iron, zinc, copper, and manganese by rapeseed in a calcareous soil. *Journal of Soil and Plant Science*, 34(4), 91–113.
<https://doi.org/10.22034/sps.2024.19185>
- Shafighi, R., Pourmohammad, A. & Aslani, I. (2025). Agronomic and yield responses of some dryland wheat cultivars to chemical fertilizers of urea and triple superphosphate in Hashtrud region. *Journal of Soil and Plant Science*, 35(1), 67–84 .
<https://doi.org/10.22034/sps.2025.66779.1005>
- 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(2), 105–113.
- Tang, X., Ma, Y., Hao, X., Li, X., Li, J., Huang, S., & Yang, X. (2009). Determining critical values of soil Olsen-P for maize and winter wheat from long-term experiments in China. *Plant and Soil*, 323(1), 143–151.
<https://doi.org/10.1007/s11104-009-9921-2>
- Thomas, G. W. (1982). Exchangeable cations. Pp. 159–165. In: A. L. Page (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 2—Chemical and microbiological properties*. SSSA, American Society of Agronomy, WI, USA.
- Thomas, G. W. (1996). Soil pH and soil acidity. Pp. 475–490. In: D. L. Sparks (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 3—Chemical methods*. Soil Science Society of America, WI, USA.
<https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c16>
- Wahba, M., Fawkia, L., & Zaghloul, A. (2019). Management of calcareous soils in arid region. *International Journal of Environmental Pollution and Environmental Modelling*, 2(5), 248–258.

- Wahid, F., Fahad, S., Danish, S., Adnan, M., Yue, Z., Saud, S., Siddiqui, M. H., Brtnicky, M., Hammerschmidt, T., & Datta, R. (2020). Sustainable management with mycorrhizae and phosphate solubilizing bacteria for enhanced phosphorus uptake in calcareous soils. *Agriculture*, 10(8), 334.
<https://doi.org/10.3390/agriculture10080334>
- 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.
<https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
- Yazdani Motlag N., Reyhanitabar A., Najafi N., & Bandehag A. (2014). Effects of combined application of nitrogen and phosphorus on the growth characteristics of rice plants under flooded and periodic saturation conditions. *Journal of Water and Soil Science*, 24(3), 145–160. (in Persian with English abstract)
- 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.
<https://doi.org/10.4314/njbas.v25i2.16>
- 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.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.189>