



Investigated the Effect of Liquid Organic Fertilizers Enriched with Different Sources of Iron on the Concentration of Nutrients in Corn (*Zea Mays* L.) and Postharvest Soil

Asma Ahmadvand^{1✉} | Ahmad Golchin² | Mehdi Jafari Asl³ | Setareh Amanifar⁴

1. Corresponding Author, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan. Zanjan, Iran. E-mail:

Asma.a9344@gmail.com

2. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan. Zanjan, Iran. E-mail:

Agolchin2011@yahoo.com

3. Farhikhtegan Zarnam Industrial Research Group, Alborz Province, Hashtgerd City, Iran. E-mail:

Mahdijafariasl@gmail.com

4. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan. Zanjan, Iran. E-mail: Amanifar@znu.ac.ir

Article Info

ABSTRACT

Article type: Research Article

Article history:

Received: May. 8, 2026

Revised: May. 31, 2026

Accepted: June. 14, 2026

Published online: July. 2026

Keywords:

Iron,

Nitrogen,

Fe-EDTA,

Fe-EDDHA,

Fe-DTPA.

An experiment was conducted to investigate the effect of different levels of amino acid-rich organic soluble fertilizers on the concentration of nutrients in corn plants and soil after harvest in a factorial manner in a completely randomized design with three replications under greenhouse conditions. The treatments included: control (C); 3% iron-containing ferrous sulfate solution (S); organic fertilizer without iron enrichment (O); separate application of organic fertilizer without iron and 3% ferrous sulfate (OS); organic fertilizer enriched with 3% iron from ferrous sulfate (A); organic fertilizer enriched with 1.5% iron from Fe-EDTA and 1.5% from ferrous sulfate (AE); organic fertilizer enriched with 1.5% iron from Fe-DTPA and 1.5% from ferrous sulfate (AD); and organic fertilizer enriched with 1.5% iron from Fe-EDDHA and 1.5% from ferrous sulfate (AH). These fertilizers were applied via fertigation at two levels, 50 and 100 L ha⁻¹, corresponding to 80 and 160 mg Fe per 3 kg of soil, respectively. The results showed that most fertilizer treatments increased the concentration of nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, magnesium, copper and zinc in the corn shoot compared to the control; however, the increase in the soil was less and only some treatments had a significant difference with the control. The AH100 treatment showed the best efficiency, so that in this treatment the concentration of iron and copper (134.75, 8.11 mg/kg dry tissue), nitrogen (2.29%), phosphorus (0.25%), potassium (2.27%), calcium (0.34%), and magnesium (0.17%) increased by 54.3, 15 17.7, 19.2, 17.4, 17.6, 14.6% respectively compared to the control in the shoot.

Cite this article: Ahmadvand, A., Golchin, A., Jafari Asl, M., & Amanifar, S. (2026). Investigated the effect of liquid organic fertilizers enriched with different sources of iron on the concentration of nutrients in corn (*Zea mays* L.) and postharvest soil., *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 57 (5),1203-1227. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.413641.670131>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.413641.670131>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Iron deficiency is one of the main factors limiting plant growth and plays an important role in crop yield, food quality, and human nutritional health. Although iron is an abundant element in soil, its availability to plants is generally very low (Zuluaga et al., 2023). Therefore, iron deficiency is one of the most important limiting variables affecting crop yield, food quality, and human nutrition. Currently, iron fertilization is the most common approach adopted in agriculture to prevent or correct iron chlorosis. For soil applications, iron fertilizers are based on iron chelated with synthetic amino carboxylate ligands (e.g. HEDTA, EDTA, DTPA, EDDHA), which are effective in retaining iron in the soil solution, even in alkaline soils, thereby increasing its bioavailability for plant uptake (Zuluaga et al., 2023). Among these chelates, the significant increase in plant iron yield and nutritional value confirms the usefulness of Fe-EDDHA application in calcareous soils (Schenkeveld et al., 2008). Along with synthetic iron chelates, the use of organic fertilizers is one of the most effective methods of plant nutrition in order to increase yield, be environmentally friendly, and achieve sustainable agricultural goals. Organic materials and fertilizers increase soil quality by improving soil structure, nutrient retention, and biological activity. Organic fertilizers have residual effects in soils and may be able to enhance plant growth and increase iron availability, making them a suitable alternative to expensive chemical iron fertilizers (Widowati et al., 2012). Accordingly, the present study was designed and implemented in a calcareous soil with the aim of investigating and comparing the effects of various types of liquid organic fertilizers enriched with different sources of iron and their different levels of application on the concentration of nutrients in corn plants and soil after harvest.

Material and Methods

A factorial greenhouse experiment with two factors—fertilizer type and application rate—was conducted in a completely randomized design using fertigation, with three replications under controlled conditions, in the greenhouse of the Farhikhtegan Zarnam Industrial–Research Group during the winter of 2024. The treatments included: control (C); 3% iron-containing ferrous sulfate solution (S); organic fertilizer without iron enrichment (O); separate application of organic fertilizer without iron and 3% ferrous sulfate (OS); organic fertilizer enriched with 3% iron from ferrous sulfate (A); organic fertilizer enriched with 1.5% iron from Fe-EDTA and 1.5% from ferrous sulfate (AE); organic fertilizer enriched with 1.5% iron from Fe-DTPA and 1.5% from ferrous sulfate (AD); and organic fertilizer enriched with 1.5% iron from Fe-EDDHA and 1.5% from ferrous sulfate (AH). These fertilizers were applied via fertigation at two levels, 50 and 100 L ha⁻¹, corresponding to 80 and 160 mg Fe per 3 kg of soil, respectively.

Results and Discussion

The results of this study showed that the application of organic fertilizers, especially liquid organic fertilizer enriched with Fe-EDDHA, significantly improved the absorption of nutrients in the aerial parts of corn plants, which, considering the increase in fresh and dry weight, indicates that this treatment improved the yield and absorption of nutrients by the plant. The AH treatment at the level of 100 liters per hectare (AH100) showed the best efficiency, as it increased the concentration of iron, nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, magnesium and copper compared to the control treatment in the aerial parts of the plant and the soil after harvest. The results indicated that the AH100 and AH50 treatments led to the highest iron concentrations in both soil and plant shoots, with increases of 57.7% and 45.6% in the soil and 54.3% and 38.9% in the shoots, respectively, compared to the control. Zinc concentration in the soil reached a maximum value of 1.71 mg/kg under the AH100 treatment, which was significantly higher than the control (1.58 mg/kg). Similarly, zinc accumulation in the aerial parts of corn was enhanced by fertilizer application, particularly in AH100 and AH50, showing increases of 16.2% and 14.7% over the control. Nitrogen concentration in the shoots was also highest in AH100 and AD100 treatments, with increases of 17.7% and 12%, while soil nitrogen content significantly increased under AH100. The highest available phosphorus level was also recorded in the AH100 treatment, with an 11.1% increase relative to the control. In addition, the AH100 treatment resulted in the highest soluble potassium concentration in the soil (0.0274%), representing an 8.8% increase over the control, and the highest shoot potassium contents (2.27%, 2.23%, and 2.22% for AH100, AH50, and AD100, respectively). Similarly, calcium concentration in both soil and shoots reached its maximum under AH100, showing significant differences from the control, with average shoot values of 0.339%, 0.335%, and 0.314% for AH100, AH50, and AD100 treatments, respectively. Moreover, all fertilizer treatments enhanced the fresh and dry weights of corn shoots compared to the control, although not all increases were statistically significant. The greatest fresh shoot biomass was achieved in the AH100, AH50, and AD100 treatments, with averages of 199.26, 186.25, and 183.45 g per pot, representing 35.8%, 26.9%, and 25% increases compared with the

control, respectively.

Conclusions

The use of liquid organic fertilizer enriched with Fe-EDDHA significantly improved the growth and nutritional status of corn, which is attributed to the increased absorption of iron and other nutrients in the plant and soil. In addition, due to the composition of this fertilizer, which contains organic matter and amino acids, it can help improve the physical, chemical and biological properties of the soil, including stimulating the activity of beneficial microorganisms. However, due to the potted nature of the experiment, the present results reflect the plant response under controlled conditions and cannot be directly generalized to field conditions. Therefore, providing a definitive recommendation regarding this treatment requires conducting field trials to assess the stability of its effects and its efficiency under real production conditions.

Funding

This article was conducted with the financial and spiritual support of the University of Zanjan.

Authorship contribution

The authors' contributions to the article extracted from the thesis should be approximately as follows:

A, Ahmadvand: Student: Preparation and preparation of samples, conducting experiments and collecting data, performing calculations, statistical analysis of data, analyzing and interpreting information and results, preparing a draft of the article.

A, Golchin: Thesis supervisor, research design, supervising the stages of research, reviewing and controlling the results, revising, reviewing and finalizing the article.

M, Jafari Asl: Thesis advisor, participation in research design, research supervision, reading and reviewing the article.

S, Amanifar: Thesis advisor, participation in research design, research supervision, reading and reviewing the article.

Declaration of Generative AI and AI-Assisted Technologies in the Writing Process

The authors did not use artificial intelligence tools to write this article.

Data availability statement

Data available on request from the author.

Acknowledgements

The authors would like to thank Zanjan Universities and Farhikhtegan Zarnam Research & Industrial Group (Zar Grain Refinery) for providing all the needed facilities.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

بررسی اثر کودهای آلی مایع غنی شده با منابع مختلف آهن بر غلظت عناصر غذایی در ذرت (*Zea mays* L.) و خاک پس از برداشت

اسما احمدوند^۱ | احمد گلچین^۲ | مهدی جعفری اصل^۳ | ستاره امانی فر^۴

۱. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: Asma.a9344@gmail.com

۲. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: Agolchin2011@yahoo.com

۳. گروه صنعتی پژوهشی فرهیختگان زرنام، استان البرز، شهر هشتگرد، ایران. رایانامه: Mahdijafariasl@gmail.com

۴. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: Amanifar@znu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

پژوهشی با هدف بررسی تأثیر سطوح مختلف کودهای آلی محلول غنی از اسیدهای آمینه بر غلظت عناصر غذایی در گیاه ذرت و خاک پس از برداشت به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در شرایط گلخانه‌ای اجرا گردید. تیمارها شامل فاقد کود (C)، محلول سولفات فرو با سه درصد آهن (S)، کود آلی مایع غنی نشده (O)، مصرف جداگانه کود آلی مایع غنی نشده و محلول سولفات فرو حاوی سه درصد آهن (OS)، کود آلی مایع غنی شده با ۳ درصد آهن از منبع سولفات فرو (A)، کود آلی مایع غنی شده با ۱/۵ درصد آهن از منبع کلات Fe-EDTA و ۱/۵ درصد آهن از منبع سولفات فرو (AE)، کود آلی مایع غنی شده با ۱/۵ درصد آهن از منبع کلات Fe-DTPA و ۱/۵ درصد آهن از منبع سولفات فرو (AD)، و کود آلی مایع غنی شده با ۱/۵ درصد آهن از منبع کلات Fe-EDDHA و ۱/۵ درصد آهن از منبع سولفات فرو آهن (AH) بودند. این کودها در دو سطح مصرف ۵۰ و ۱۰۰ لیتر در هکتار، معادل به ترتیب ۸۰ و ۱۶۰ میلی گرم آهن در سه کیلوگرم خاک، طی دو نوبت به صورت کودآبیاری به کار رفتند. نتایج نشان داد اغلب تیمارهای کودی موجب افزایش غلظت نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیم، مس و روی در اندام هوایی ذرت نسبت به شاهد شدند؛ هرچند در خاک میزان افزایش کمتر بوده و تنها برخی تیمارها با شاهد اختلاف معنی دار داشتند. تیمار AH در سطح ۱۰۰ لیتر در هکتار (AH100) بهترین کارایی را نشان داد، به طوری که در این تیمار غلظت آهن و مس (۱۳۴/۷۵ و ۸/۱۱ میلی گرم در کیلوگرم ماده خشک)، نیتروژن (۲/۲۹ درصد)، فسفر (۰/۲۵ درصد)، پتاسیم (۲/۲۷ درصد)، کلسیم (۰/۳۴ درصد) و منیزیم (۰/۱۷ درصد) به ترتیب به میزان ۱۵، ۵۴/۳، ۱۷/۷، ۱۹/۲، ۱۷/۴، ۱۷/۶ و ۱۴/۶ درصد نسبت به شاهد در اندام هوایی افزایش یافت.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۲/۱۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۳/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۳/۲۴

تاریخ انتشار: مرداد ۱۴۰۵

واژه‌های کلیدی:

آهن،

نیتروژن،

Fe-EDTA

Fe-EDDHA

Fe-DTPA

استناد: احمدوند، اسما؛ گلچین، احمد؛ جعفری اصل، م و امانی فر، ستاره (۱۴۰۵). بررسی اثر کودهای آلی مایع غنی شده با منابع مختلف آهن بر غلظت عناصر غذایی در ذرت (*Zea mays* L.) و خاک پس از برداشت، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۷ (۵)، ۱۲۰۳-۱۲۲۷.



<https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.413641.670131>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.413641.670131>

مقدمه

آهن (Fe) یک ریزمغذی ضروری برای رشد و بهره‌وری گیاه است و در میان سایر ریزمغذی‌ها به مقدار قابل توجهی مورد نیاز است. اگرچه آهن در خاک فراوان است، اما دسترسی گیاهان به آن اندک است، زیرا در شرایط هوازی عمدتاً به صورت Fe^{3+} و ترکیبات اکسید و هیدروکسید نامحلول وجود دارد. همچنین در خاک‌های آهکی به دلیل pH بالا و حضور کربنات‌ها، آهن به صورت کربنات‌های نامحلول یا ترکیبات تثبیت شده رسوب کرده و قابلیت جذب آن به شدت کاهش می‌یابد. علاوه بر این، تحرک کم آهن در خاک نیز انتقال آن به ناحیه ریشه را محدود می‌کند، بنابراین با وجود فراوانی کل آهن در خاک، مقدار قابل استفاده آن برای گیاه بسیار ناچیز است (Zuluaga et al., 2023)؛ بنابراین، کمبود آهن یکی از مهم‌ترین متغیرهای محدودکننده است که بر عملکرد محصول، کیفیت غذا و تغذیه انسان تأثیر می‌گذارد. جذب ناکافی آهن منجر به کلروز بین رگ‌برگی، توقف رشد، کاهش ارزش غذایی و کاهش عملکرد گیاه می‌شود (Schmidt et al., 2019). بر اساس گزارش‌ها، یک سوم زمین‌های کشاورزی جهان از کمبود آهن رنج می‌برند که در نتیجه سالانه میزان قابل توجهی بهره‌وری کشاورزی به‌ویژه در خاک‌های آهکی را کاهش می‌دهد (Zuo et al., 2011). بنابراین، گیاهان مجموعه‌ای از روش‌ها را برای جذب، انتقال و استفاده از آهن در طول تکامل طولانی مدت خود توسعه داده‌اند (Ning et al., 2023). این روش‌ها شامل: اسیدی شدن (که با ترشح اسیدهای آلی یا پروتون‌ها تسهیل می‌شود)، کلات کردن آهن توسط لیگاندها (که ممکن است شامل سیدروفورهای باشد که میل ترکیبی بسیار قوی برای Fe^{3+} دارند) و کاهش Fe^{3+} به Fe^{2+} (از طریق عمل ردوکنزها و کاهنده‌ها) است (Lemanceau et al., 2009). ذرت، یک گونه گیاهی تک‌لپه‌ای با استراتژی کلات کردن، فیتوسیدروفورهای را آزاد می‌کند که کمپلکس‌های محلول با یون فریک تولید می‌کنند و در دسترس بودن آهن را در ریزوسفر افزایش می‌دهند. کمپلکس فریک بدون کاهش آهن (Fe^{3+} -فیتوسیدروفور) توسط ریشه‌ها جذب می‌شود (Kobayashi & Nishizawa, 2012). آهن یک کاتالیزور در تولید کلروفیل است و در چندین سیستم آنزیمی گیاهی نقش دارد. در اکثر گیاهان، به‌ویژه در گیاهان دو لپه‌ای، شکل جذبی اصلی آهن Fe^{2+} است، اما در گیاهان خانواده گرامینه مانند ذرت، آهن به صورت کمپلکس Fe^{3+} -فیتوسیدروفور نیز جذب می‌شود. علائم کمبود آهن کلروز بین رگ‌برگی است، یعنی رنگ برگ زرد تا سفید که در آن رگ‌برگ‌ها سبز باقی می‌مانند. با توجه به غیرمتحرک بودن آهن در گیاه ظهور علائم کمبود در برگ‌های جوان‌تر ایجاد می‌شود (Schulte & Kelling, 2004).

در حال حاضر، کوددهی آهن رایج‌ترین رویکرد اتخاذ شده در کشاورزی برای جلوگیری یا اصلاح کلروز آهن است. برای کاربردهای خاکی، کودهای آهن بر پایه آهن کلات شده با لیگاندهای مصنوعی آمینوکربوکسیلات (مانند EDTA، DTPA، EDDHA، HEDTA) هستند که در حفظ آهن در محلول خاک، حتی در خاک‌های قلیایی و در نتیجه افزایش فراهمی زیستی آن برای جذب گیاه مؤثر هستند (Zuluaga et al., 2023). در بین این کلات‌ها، افزایش قابل توجه در عملکرد و ارزش غذایی آهن گیاه، مفیدبودن کاربرد Fe-EDDHA در خاک‌های آهکی را تأیید می‌کند (Schenkeveld et al., 2008). در کنار کلات‌های مصنوعی آهن استفاده از کودهای آلی از مؤثرترین شیوه‌های تغذیه گیاه در راستای افزایش عملکرد، سازگار با محیط‌زیست و نیل به اهداف کشاورزی پایدار است. مواد و کودهای آلی کیفیت خاک را از طریق بهبود ساختمان خاک، نگهداری مواد غذایی و فعالیت بیولوژیکی افزایش می‌دهند. کودهای آلی دارای اثرات باقیمانده در خاک‌ها بوده و ممکن است بتوانند علاوه بر تقویت رشد گیاه، قابلیت استفاده آهن را افزایش داده و جایگزین مناسبی برای کودهای شیمیایی گران‌قیمت آهن باشند (Widowati et al., 2012). در واقع این کودها نه تنها باعث افزایش عملکرد پایدار شده بلکه می‌توانند میزان مواد آلی خاک را افزایش دهند، باعث آزاد شدن عناصر غذایی خاک، حفظ اثربخشی عناصر غذایی خاک، بهبود ظرفیت انتقال آهن در گیاهان و افزایش جذب آهن توسط گیاهان شوند (Mohammad et al., 2018). به عنوان مثال، EDTA، DTPA، HEDTA و کود مرغی می‌توانند به طور مؤثری میزان آهن قابل دسترس در خاک را افزایش دهند، علائم کمبود آهن در گیاهان را بهبود دهند، وزن و عملکرد میوه را افزایش دهند و کیفیت میوه را بهبود دهند (Ana et al., 2004). در این زمینه، هیدرولیزات‌های پروتئینی مشتق شده از گیاهان در کنار کلات‌های مصنوعی می‌توانند منابع خوبی از لیگاندهای کلات‌کننده برای توسعه کودهای آهن نوآورانه برای کشاورزی پایدار باشند (Zuluaga et al., 2023). یکی از این هیدرولیزات پروتئینی مایعی غنی از ماده آلی به نام خیس آب ذرت تخمیری است که با تأثیر بر فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه و تحریک مسیرهای رشدی، قابلیت استفاده به‌عنوان پایه‌ای برای تولید کودهای آلی محلول و اصلاح‌کننده‌های خاک را دارند و می‌توانند موجب بهبود رشد و عملکرد گیاه شوند (Obayori et al., 2015). در واقع کلات شدن اسیدهای آمینه به عناصر غذایی و تشکیل مواد معدنی کلات شده، در مقایسه با منابع معدنی آن‌ها، قابلیت دسترسی به عناصر را افزایش داده و راندمان جذب و



انتقال عناصر را در گیاهان افزایش می‌دهد (Jacob et al., 2021). همچنین Souri & Aslani (۲۰۱۸) نشان دادند که کودهای کلات با پایه آلی می‌توانند جایگزین مؤثرتری برای نمک‌های شیمیایی ساده در خاک‌های آهکی باشند.

بیشتر پژوهش‌های مرتبط با کودهای آلی غنی از آهن در شرایط کنترل‌شده یا محیط‌های کشت مصنوعی انجام شده و اطلاعات اندکی درباره عملکرد این کودها در خاک‌های آهکی و تأثیر آن‌ها بر غلظت عناصر غذایی در گیاه و خاک پس از برداشت وجود دارد. همچنین، مطالعات مقایسه‌ای همزمان بین منابع مختلف آهن نظیر Fe-EDTA، Fe-DTPA و Fe-EDDHA در ترکیب با کودهای آلی مایع حاوی اسیدهای آمینه، در شرایط واقعی خاک بسیار محدود بوده و فاقد نتایج جامع هستند. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف بررسی و مقایسه تأثیر انواع کودهای آلی مایع غنی‌شده با منابع مختلف آهن و سطوح مختلف مصرف آن‌ها بر غلظت عناصر غذایی در گیاه ذرت و خاک پس از برداشت، در یک خاک آهکی طراحی و اجرا شد. فرضیه اصلی این مطالعه آن است که کاربرد کودهای آلی محلول حاوی منابع مختلف آهن، موجب افزایش غلظت عناصر غذایی در ذرت و بهبود شاخص‌های حاصلخیزی خاک پس از برداشت خواهد شد.

مواد و روش‌ها

سنتز کودها

در این پژوهش، ماده آلی محلول پایه مورد استفاده برای تهیه کودها از هیدرولیز پروتئین‌های گیاهی حاصل از فراوری ذرت طی فرایند آسیاب مرطوب ذرت از پالایشگاه غلات زر تهیه گردید. این ماده به صورت مایع غلیظی بود که حاوی مقادیر قابل توجهی از اسیدهای آمینه آزاد (۶ درصد)، اسیدهای آلی و سایر ترکیبات مغذی بود (جدول ۱). محلول ذکر شده به عنوان کود پایه آلی در ساخت و غنی‌سازی با منابع مختلف آهن مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۱. نتایج تجزیه مایع حاصل از فراوری ذرت.

مقدار	واحد	ترکیب
۲۵	درصد	آمینواسید کل
۶	درصد	آمینواسید آزاد
۳	درصد	نیترژن کل (N)
۲/۵	درصد	فسفر قابل جذب (P_2O_5)
۲	درصد	پتاسیم محلول در آب (K_2O)
۳۰	درصد	ماده آلی (OM)
۱۳	درصد	اسیدهای آلی
۱۱	درصد	کربن آلی (OC)
۱۰۰۰	میلی گرم در کیلوگرم	آهن (Fe)
۵۰۰	میلی گرم در کیلوگرم	روی (Zn)
۶۰۰	میلی گرم در کیلوگرم	منگنز (Mn)
۵۰۰	میلی گرم در کیلوگرم	کلسیم (CaO)
۵۰۰	میلی گرم در کیلوگرم	منیزیم (MgO)
۶۰۰	میلی گرم در کیلوگرم	سیلیسیم
۳	درصد	پلی ساکارید
۳/۵	-	pH

برای تهیه کودهای آلی مایع غنی‌شده با آهن، مقدار مشخصی از سولفات فرو ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) به ماده آلی محلول پایه افزوده شد، به گونه‌ای که غلظت نهایی آهن در محلول به ۳ درصد برسد. سپس مخلوط در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد و در pH تقریبی ۵ به مدت دو ساعت تحت هم‌زدن مداوم قرار گرفت تا بخشی از اسیدهای آمینه با یون‌های Fe^{2+} واکنش داده و کمپلکس‌های فلزی-آلی تشکیل شوند. نتایج حاصل از آنالیز کروماتوگرافی نشان داد که کم‌تر از یک درصد از کل آهن موجود به شکل آمینوکلات حضور داشته و بخش عمده آهن به صورت ترکیبات ساده‌تر آلی-معدنی یا کمپلکس‌های ناپایدار در محلول باقی‌مانده است. پس از سردشدن محلول تا دمای محیط، نمونه‌ها در ظروف شیشه‌ای تیره و دور از نور نگهداری شدند (Hsu, 1996).

به منظور افزایش پایداری و قابلیت جذب آهن، سه نوع کلات مصنوعی شامل Fe-EDTA، Fe-DTPA و Fe-EDDHA به طور جداگانه

سنتر گردید. در هر مورد، لیگاند مربوطه (EDTA، DTPA یا EDDHA) در آب مقطر حل شد و محلول سولفات فرو به آرامی و تحت بهم‌زدن مداوم به آن افزوده گردید. واکنش‌ها در دمای ۶۰ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد و در محدوده‌ی pH کنترل شده انجام گرفت تا از تشکیل رسوب جلوگیری و کمپلکس پایدار آهن حاصل شود. در سنتر کلات Fe-EDDHA، پی‌اچ نهایی روی حدود ۸/۵ تنظیم گردید تا ایزومر پایدارتر ارتو-ارتو غالب گردد. در مرحله‌ی نهایی، ماده آلی محلول پایه که حاوی آهن کمپلکس شده بود، با هر یک از کلات‌های مصنوعی تهیه شده ترکیب گردید، به طوری که در هر ترکیب، غلظت کل آهن سه درصد بود و نیمی از آن از منبع سولفات فرو و نیمی دیگر از یکی از کلات‌های مصنوعی تأمین شد. مخلوط‌ها در دمای محیط به آرامی و به مدت یک ساعت به هم زده شدند تا آهن به صورت یکنواخت در فاز آلی توزیع شود. مقدار pH نهایی نیز در محدوده‌ی ۵ تا ۸/۵ تنظیم گردید تا پایداری ترکیب حفظ شود. در نتیجه، چهار نوع کود آلی مایع غنی شده با آهن تولید گردید که عبارت بودند از: کود AD، کود آلی مایع غنی شده با ۳ درصد آهن از منبع سولفات فرو؛ کود AE، کود آلی مایع غنی شده با ۱/۵ درصد آهن از منبع کلات Fe-EDTA و ۱/۵ درصد آهن از منبع سولفات فرو؛ کود AD، کود آلی مایع غنی شده با ۱/۵ درصد آهن از منبع کلات Fe-DTPA و ۱/۵ درصد آهن از منبع سولفات فرو؛ و کود AH، کود آلی مایع غنی شده با ۱/۵ درصد آهن از منبع کلات Fe-EDDHA و ۱/۵ درصد آهن از منبع سولفات فرو. تمامی نمونه‌ها تا زمان انجام آزمایش‌های گلخانه‌ای در ظروف شیشه‌ای قهوه‌ای رنگ و در دمای اتاق نگهداری شدند تا از بروز تغییرات احتمالی در ترکیب و اکسیداسیون آهن جلوگیری شود (Miroshnychenko et al., 2008).

شناسایی کلات‌های آهن در کودهای ساخته شده به روش کروماتوگرافی (HPLC)

برای شناسایی و تعیین مقدار کل کلات‌های آهن در کودهای تولید شده، از روش کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا^۱ (HPLC) استفاده شد. کروماتوگرافی یک روش متداول جداسازی اجزای مخلوط است که بر اساس توزیع فیزیکی ترکیبات میان فاز ساکن و فاز متحرک عمل می‌کند. آنالیزها با استفاده از دستگاه HPLC فاز معکوس مجهز به ستون C18 با ابعاد $250 \times 4/6$ میلی‌متر و اندازه ذرات ۵ میکرون، در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد انجام گرفت. سرعت جریان فاز متحرک ۱ میلی‌لیتر در دقیقه تنظیم شد و زمان آنالیز هر نمونه حدود ۱۰ دقیقه بود. برای هر نمونه، حجم ۲۰ میکرولیتر به دستگاه تزریق و کروماتوگرام مربوطه ثبت شد. به منظور افزایش دقت و تکرارپذیری نتایج، هر اندازه‌گیری سه بار انجام گرفت. در تجزیه کمی، از روش منحنی استاندارد خارجی استفاده شد؛ به این منظور، استانداردهای خالص کلات‌های مختلف آهن در غلظت‌های متفاوت تهیه و تزریق شدند و منحنی استاندارد با رسم سطح زیر پیک در برابر غلظت، با استفاده از نرم‌افزار Excel ترسیم گردید.

بر اساس زمان بازداری، نوع کلات موجود در نمونه شناسایی و با استفاده از سطح زیر پیک و منحنی‌های کالیبراسیون، غلظت هر کلات در نمونه محاسبه گردید (Lucena et al., 1996).

تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

نمونه خاک از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری یک زمین کشاورزی واقع در شهرستان مهستان در استان البرز برداشت شد. خاک را پس از هوا خشک شدن از الک دو میلی‌متری عبور داده و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی اولیه آن با استفاده از روش‌های استاندارد تعیین و در جدول ۲ نشان داده شده است.

کشت گیاه

این پژوهش به صورت آزمایش گلخانه‌ای و در قالب طرح کاملاً تصادفی به صورت فاکتوریل با دو فاکتور نوع و سطح کود مصرفی اجرا گردید. تیمارهای کودی در طی دو مرحله در زمان‌های ۳۰ و ۶۰ روز پس از کاشت به روش کودآبیاری اعمال شدند و آزمایش در سه تکرار انجام پذیرفت (Stewart et al., 2021). این مطالعه در زمستان سال ۱۴۰۳ در گلخانه گروه صنعتی پژوهشی فرهیختگان زرنام و تحت شرایط کنترل شده انجام شد. تاریخ‌های کاشت و برداشت به ترتیب ۳۰ دی و ۲۰ فروردین ماه بود. برای اجرای آزمایش، نمونه‌های خاک به میزان سه کیلوگرم در گلدان‌های پلاستیکی (با ارتفاع ۱۷ سانتی‌متر و قطر دهانه ۱۸/۵ سانتی‌متر) توزین و ریخته شدند. در هر گلدان پنج بذر ذرت هیبرید ۷۰۳ (تأمین شده از شرکت توسعه کشت ذرت) کاشته شد. پس از مرحله استقرار و جوانه‌زنی، تعداد گیاهان در هر گلدان به دو بوته کاهش یافت. تیمارهای آزمایشی شامل شاهد، فاقد کود (C)، محلول سولفات فرو با ۳ درصد آهن (S)، کود آلی مایع



غنی نشده (O)، مصرف جداگانه کود آلی مایع غنی نشده و محلول سولفات فرو حاوی ۳ درصد آهن (OS)، کود آلی مایع غنی شده با ۳ درصد آهن از منبع سولفات فرو (A)، کود آلی مایع غنی شده با ۱/۵ درصد آهن از منبع کلات Fe-EDTA و ۱/۵ درصد آهن از منبع سولفات فرو (AE)، کود آلی مایع غنی شده با ۱/۵ درصد آهن از منبع کلات Fe-DTPA و ۱/۵ درصد آهن از منبع سولفات فرو (AD)، و کود آلی مایع غنی شده با ۱/۵ درصد آهن از منبع کلات Fe-EDDHA و ۱/۵ درصد آهن از منبع سولفات فرو آهن (AH) بودند. تمامی تیمارهای کودی در دو سطح ۵۰ و ۱۰۰ لیتر در هکتار که به ترتیب معادل ۸۰ و ۱۶۰ میلی گرم آهن در ۳ کیلوگرم خاک بود.

جدول ۲. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده برای کشت

ویژگی	مقدار	واحد	روش اندازه‌گیری
رس	۳۰	درصد	Gee and Boder, 2002
سیلت	۴۵	درصد	
شن	۲۵	درصد	
کلاس یافت	لومی رسی	-	Thomas, 1996
pH	۷/۹۳	-	
کربنات کلسیم معادل	۱۱/۴	درصد	Loeppert and Suarez, 1996
هدایت الکتریکی (EC)	۰/۲۵	دسی زیمنس بر متر	Rhoades, 1996
کربن آلی	۰/۷	درصد	Nelson and Sommers, 1996
نیتروژن کل	۷۱۰	میلی گرم در کیلوگرم خاک	Bremner, 1996
فسفر قابل استخراج با بی کربنات سدیم	۱۱/۱۲	میلی گرم در کیلوگرم خاک	Olsen et al., 1954
پتاسیم قابل جذب	۲۸۶	میلی گرم در کیلوگرم خاک	
آهن قابل استخراج با دی تی پی ا	۸/۰۲	میلی گرم در کیلوگرم خاک	
روی قابل استخراج با دی تی پی ا	۱/۶۷	میلی گرم در کیلوگرم خاک	Lindsay and Norvell, 1954
مس قابل استخراج با دی تی پی ا	۲/۲۳	میلی گرم در کیلوگرم خاک	

اندازه‌گیری ویژگی‌های رشد گیاه و غلظت عناصر غذایی در اندام هوایی و خاک پس از برداشت

در پایان فصل رشد، اندام هوایی از محل طوقه جدا گردیده و پس از خرد شدن، وزن تر آن‌ها با ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۱ گرم تعیین شد، نمونه‌های گیاهی حاصل از تیمارهای مختلف ابتدا در آون خشک شده (در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت) و پس از توزین، آسیاب شدند، سپس یک گرم ماده خشک گیاه در دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس خاکستر شده و ۵ میلی لیتر اسید کلریدریک ۲ نرمال به آن افزوده شد تا نمونه حل شود. نمونه حل شده از کاغذ صافی واتمن ۴۲ عبور داده شد و حجم محلول صاف شده با استفاده از آب مقطر تا ۵۰ میلی لیتر رقیق شد. غلظت عناصر آهن، منگنز، مس، روی، کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم با استفاده از دستگاه جذب اتمی (Shimadzu, AA-7000) اندازه‌گیری شد (Gupta et al., 2024)، نیتروژن و فسفر به ترتیب با روش‌های کج‌دال (Bremner, 1996) و اسپکتروفتومتر (Murphy and Riley., 1962) اندازه‌گیری شد. همچنین جهت اندازه‌گیری غلظت عناصر غذایی در خاک پس از برداشت از روش‌های استاندارد ذکر شده در جدول ۲ استفاده شد.

تجزیه و تحلیل آماری

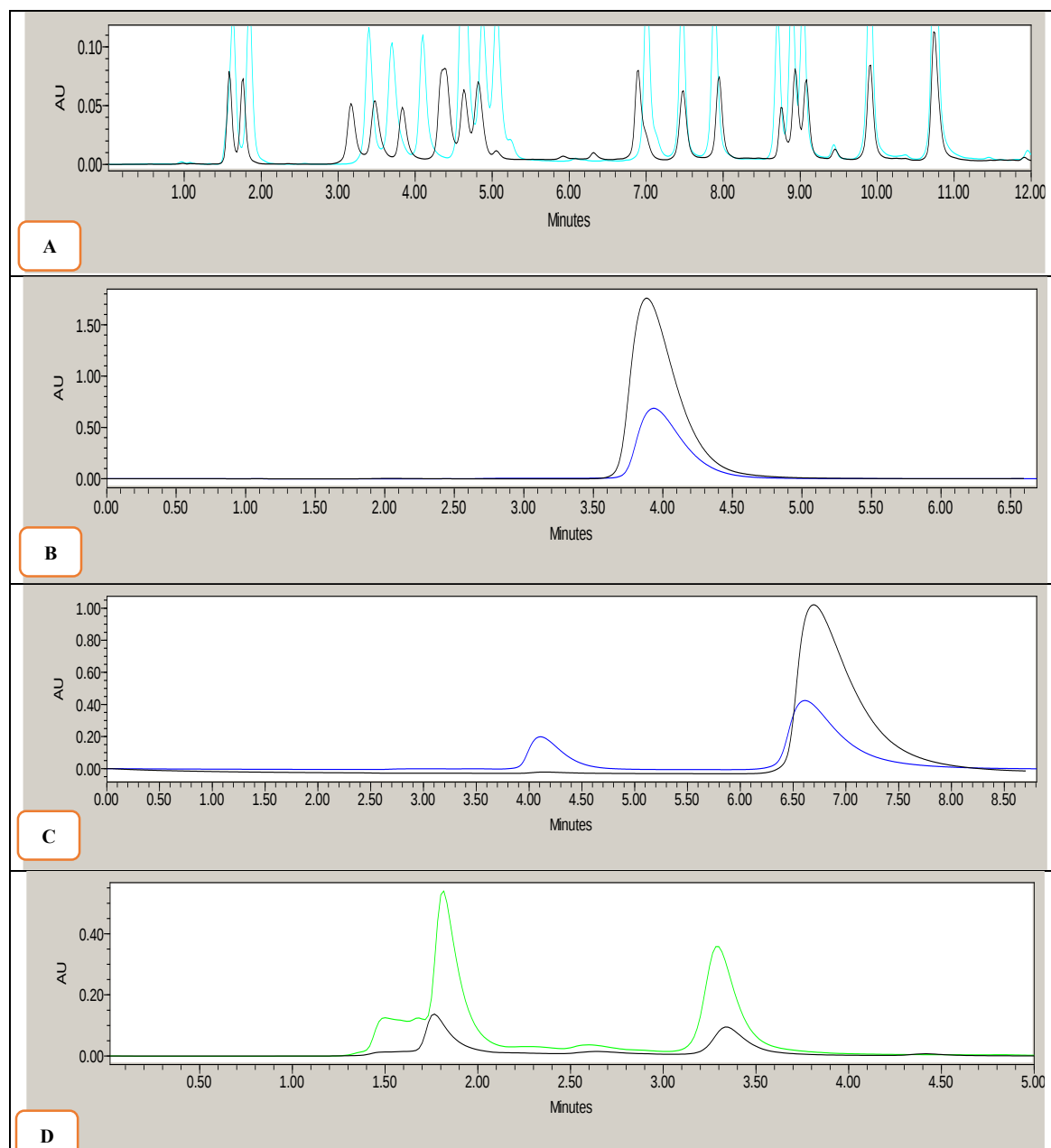
داده‌های حاصل از اندازه‌گیری صفات رشد گیاه و غلظت عناصر غذایی با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. مقایسه میانگین‌ها با آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد انجام شد و نمودارهای مربوط با نرم‌افزار Excel ترسیم گردیدند.

نتایج و بحث

کروماتوگرافی

بررسی کروماتوگرام کود آمینوکلات مایع (شکل ۱-۱) نشان داد که هیچ پیک جدید یا مجزایی که بتوان آن را به طور قطعی به تشکیل کمپلکس اسید آمینه-آهن نسبت داد، نسبت به پیک استاندارد مشاهده نشد. در نتیجه، تحت شرایط کروماتوگرافی مورد استفاده، شواهد مستقلى از تشکیل کلات به دست نیامد. با این وجود، احتمال تشکیل کلات‌هایی با غلظت پایین یا کلات‌های هم‌محل با سایر اجزای آلی غالب وجود دارد که در این کروماتوگرام قابل شناسایی نبوده‌اند. در کروماتوگرام کود AE (شکل ۱-۲) پیکی مشاهده شد که زمان بازداری

آن منطبق بر پیک استاندارد Fe-EDTA بود. این انطباق، تشکیل کمپلکس Fe-EDTA را در این نمونه تأیید کرد و بر اساس محاسبه سطح زیر پیک، مقدار آن ۰/۷۲ درصد تعیین شد (جدول ۳). همچنین، مقایسه کروماتوگرام کود AD با استاندارد Fe-DTPA (شکل ۱-C) نشان داد که پیک اصلی نمونه در زمان بازداری مشابه استاندارد Fe-DTPA ظاهر شده که دلیلی بر تشکیل کمپلکس Fe-DTPA در این کود است. در نمونه کود AH نیز پیک‌هایی با زمان بازداری و شکل مشابه استاندارد Fe-EDDHA مشاهده شد (شکل ۱-D) که نشان‌دهنده تشکیل کمپلکس Fe-EDDHA در این کود بوده و مقدار آن بر اساس سطح زیر پیک محاسبه و در جدول ۳ گزارش شده است.



شکل ۱. کروماتوگرام‌های (A) آمینوکلات آهن + گراف استاندارد اسیدهای آمینه (گراف سیاه رنگ)، (B) تیمار AE + گراف استاندارد کلات Fe-EDTA (گراف آبی رنگ)، (C) کود AD + گراف استاندارد کلات Fe-DTPA (گراف آبی رنگ)، (D) کود AH + گراف استاندارد کلات Fe-EDDHA (گراف سیاه رنگ).

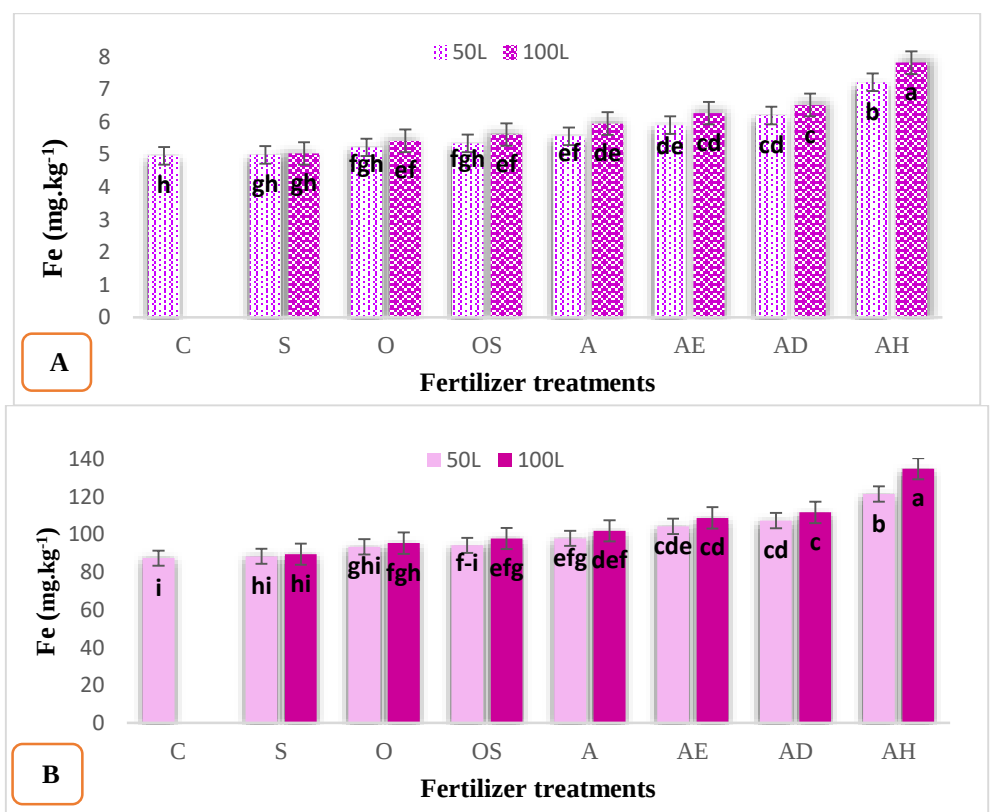
جدول ۳. درصد آهن کلات شده بدست آمده از سطح زیر گراف در کروماتوگرام‌ها

نوع کلات	آهن کلات شده (%)
Fe-EDTA	۰/۷۲
Fe-DTPA	۱/۷۳

غلظت عناصر غذایی

غلظت آهن

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر تیمارهای مختلف کود آلی و سطوح مختلف مصرف کود بر غلظت آهن در خاک و غلظت آهن در اندام هوایی گیاه ذرت در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود. همچنین اثر متقابل نوع کود آلی و سطح مصرف آن بر اندام هوایی گیاه ذرت در سطح احتمال پنج درصد معنی دار بود در حالی که بر غلظت آهن در خاک معنی دار نبود (جدول ۴). نتایج مقایسه میانگین اثرات اصلی تیمارها نشان می دهد که نوع کود و سطوح مصرفی کود تأثیر معنی داری بر غلظت آهن در خاک و اندام هوایی گیاه داشتند (جدول ۵)، بالاترین غلظت آهن در خاک برای تیمارهای AH₁₀₀ و AH₅₀ به ترتیب با افزایش ۵۷/۷ و ۴۵/۶ درصد نسبت به شاهد به دست آمد (شکل ۲). همچنین بیشترین غلظت آهن در اندام هوایی مربوط به تیمارهای AH₁₀₀ و AH₅₀ بود که به ترتیب ۵۴/۳، ۳۸/۹ و ۲۷/۸ درصد نسبت به شاهد افزایش داشتند. در مورد تیمار AH₁₀₀، بیشترین افزایش مقدار آهن در مقایسه با شاهد در سطح ۱۰۰ (لیتر در هکتار) بود که با تجمع بیشتر زیست توده نیز مطابقت دارد. در بین تیمارهای کودی مختلف AH₁₀₀ بیشترین اثر را داشت زیرا در pH خاک های آهکی Fe-EDDHA پایدارترین کلات آهن است در نتیجه حلالیت خود را حفظ کرده و مقدار آهن بیشتری در اختیار گیاه قرار داده است. این نتایج با نتایج Liu و همکاران (۲۰۱۶) که بیان کردند استفاده از کود ترکیبی حاوی سترات آهن و Fe-EDDHA، به طور مؤثری محتوای آهن را در برگ ها و دانه ها به طور قابل توجهی افزایش داد، همخوانی دارد. همچنین استفاده از کلات های Fe-EDTANa₂ و Fe-EDDHA با غلظت ۸۰ میلی گرم بر کیلوگرم، غلظت آهن در دانه ها را به ترتیب ۳۴/۸۶ و ۴۴/۰۵ درصد افزایش داد (Zhang et al., 2021). تیمار Fe-EDDHA هم عملکرد (تا ۳۰ درصد) و هم محتوای آهن گیاه (تا ۵۰ درصد) را افزایش داد (Schenkeveld et al., 2008). در مقابل، کودهای آلی خاک نه تنها حاوی آهن، عملکرد پایدار و عمدتاً محلول در آب هستند، بلکه می توانند میزان مواد آلی خاک را افزایش دهند، باعث آزاد شدن عناصر غذایی خاک، حفظ اثربخشی عناصر غذایی خاک، بهبود ظرفیت انتقال آهن در گیاهان و افزایش جذب آهن توسط گیاهان شوند (Mohammad et al., 2018).



شکل ۲. اثر تیمارها و سطوح کودی بر غلظت آهن در خاک (میلی گرم در کیلوگرم خاک) (A) و اندام هوایی

(میلی گرم در کیلوگرم ماده خشک) (B) گیاه ذرت. حروف متفاوت در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون LSD معنی-دار هستند.

جدول ۴. نتایج تجزیه واریانس اثر نوع کود، سطوح کودی و اثر متقابل آنان بر غلظت آهن، روی، مس و منگنز در خاک و گیاه ذرت.								
منابع تغییرات	درجه آزادی	آهن خاک	روی خاک	مس خاک	منگنز خاک	آهن گیاه	روی گیاه	مس گیاه
میلی گرم در کیلوگرم خاک					میلی گرم در کیلوگرم ماده خشک			
نوع کود	۷	۴/۲۹**	۰/۰۱۲*	۰/۰۱۹*	۰/۰۰۹ ^{ns}	۱۰۵۹**	۹/۶۱**	۰/۷۲**
سطوح کودی	۱	۰/۸۹**	۰/۰۰۱ ^{ns}	۰/۰۰۲ ^{ns}	۰/۰۰۸ ^{ns}	۲۰۴**	۲/۹۱ ^{ns}	۰/۱۹ ^{ns}
اثر متقابل نوع کود و سطوح کودی	۷	۰/۰۵۸ ^{ns}	۰/۰۰۰۸ ^{ns}	۰/۰۰۰۲ ^{ns}	۰/۰۰۲ ^{ns}	۲۵/۲۷*	۰/۳۹ ^{ns}	۰/۰۲ ^{ns}
خطا	۳۲	۰/۰۸	۰/۰۰۵	۰/۰۰۸	۰/۰۰۳	۲۱/۹۰	۳/۲۷	۰/۲۰
ضریب تغییرات (%)	-	۴/۸	۴/۵	۴/۲	۸/۶	۴/۶	۷/۴۷	۵/۹۹

* و ** معنی دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و ^{ns} غیرمعنی دار

جدول ۵. میانگین اثرات اصلی سطوح کودی و نوع کود بر غلظت عناصر میکرو در خاک (میلی گرم در کیلوگرم خاک) و گیاه (میلی گرم در کیلوگرم ماده خشک)

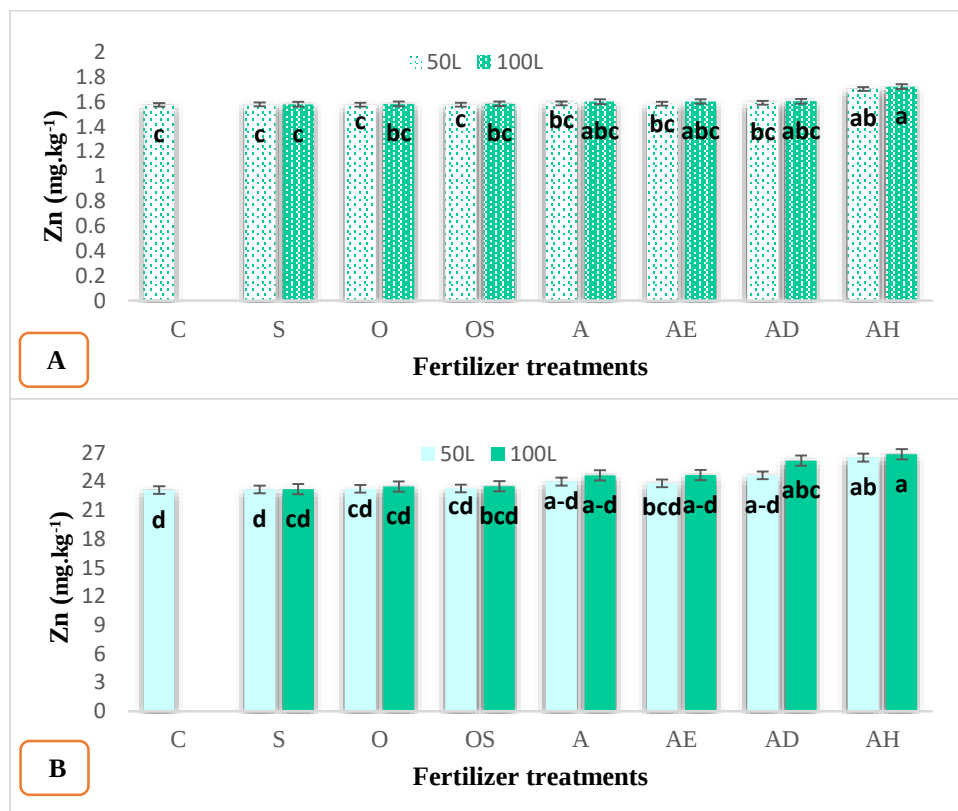
نوع کود	آهن خاک	روی خاک	مس خاک	منگنز خاک	آهن گیاه	روی گیاه	مس گیاه	منگنز گیاه
میلی گرم در کیلوگرم خاک					میلی گرم در کیلوگرم ماده خشک			
C	۴/۹۶ F	۱/۵۷۵ B	۲/۱۳۶ B	۱/۹۳ A	۸۷/۳۵ E	۲۳/۱۱ C	۷/۰۵ D	۲۱/۴۲ C
S	۵/۰۱ EF	۱/۵۷۹ B	۲/۱۳۹ B	۱/۹۳ A	۸۸/۹۰ DE	۲۳/۱۹ C	۷/۱۲ D	۲۱/۴۷ C
O	۵/۳۲ DE	۱/۵۷۹ B	۲/۱۵۶ B	۱/۹۴ A	۹۴/۳۴ CD	۲۳/۳۷ BC	۷/۱۵ CD	۲۱/۹۰ C
OS	۵/۴۷ CD	۱/۵۸۰ B	۲/۱۶۴ B	۱/۹۵ A	۹۵/۹۵ C	۲۳/۳۹ BC	۷/۱۶ CD	۲۱/۹۲ C
A	۵/۷۵ C	۱/۵۹۴ B	۲/۱۷۴ B	۱/۹۵ A	۹۹/۸۳ C	۲۴/۳۳ BC	۷/۱۰ AB	۲۲/۵۳ BC
AE	۶/۰۹ B	۱/۵۹۳ B	۲/۱۶۷ B	۱/۹۶ A	۱۰۶/۴۵ B	۲۴/۲۴ BC	۷/۳۵ BCD	۲۲/۶۱ ABC
AD	۶/۳۶ B	۱/۵۹۷ B	۲/۱۶۸ B	۲/۰۱ A	۱۰۹/۴۶ B	۲۵/۴۱ AB	۷/۶۶ ABC	۲۴/۰۶ AB
AH	۷/۵۲ A	۱/۷۱۲ A	۲/۳۱۲ A	۲/۰۴ A	۱۲۸/۰۵ A	۲۶/۶۹ A	۸/۰۰ A	۲۴/۵۹ A
سطح کود								
۱۰۰	۵/۹۵ A	۱/۶۰۶ A	۲/۱۸۳ A	۱/۹۸ A	۱۰۳/۳۶ A	۲۴/۴۶ A	۷/۴۶ A	۲۲/۶۹ A
۵۰	۵/۶۷ B	۱/۵۹۶ A	۲/۱۷۱ A	۱/۹۵ A	۹۹/۲۲ B	۲۳/۹۷ A	۷/۳۴ A	۲۲/۴۳ A

روی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر کودهای آلی بر غلظت روی در خاک در سطح احتمال پنج درصد معنی دار است در حالی که سطوح مصرفی کود و اثر متقابل آن‌ها از نظر آماری معنی دار نبود. (جدول ۶). همچنین نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر کودهای آلی بر غلظت روی در اندام هوایی ذرت در سطح احتمال یک درصد معنی دار است با این حال سطوح مصرفی و اثر متقابل آن‌ها از نظر آماری معنی دار نبود (جدول ۱۱). جدول ۵ مربوط به مقایسه میانگین اثرات اصلی تیمارها بر غلظت روی در خاک پس از برداشت ذرت و اندام هوایی گیاه نشان داد که سطوح مختلف کودی (۵۰ و ۱۰۰ لیتر در هکتار) تأثیر معنی داری بر غلظت روی در خاک و گیاه نداشت. اثر متقابل نوع کود نشان داد بیشترین غلظت روی در تیمار AH₁₀₀ با میانگین ۱/۷۱ میلی گرم بر کیلوگرم خاک بود که اختلاف معنی داری با تیمار شاهد (۱/۵۸ میلی گرم بر کیلوگرم خاک) داشت که بیانگر تثبیت نسبی این عنصر در خاک است. در مقابل، کاربرد تیمارهای مختلف کودی به طور معنی داری باعث افزایش غلظت روی در اندام هوایی ذرت شد، به ویژه تیمارهای AH₁₀₀ و AH₅₀ شد که باعث افزایش غلظت روی به ترتیب به میزان ۱۶/۲ و ۱۴/۷ درصدی نسبت به شاهد شدند (شکل ۳-B). یکی از دلایل افزایش دو تیمار کودی (AH₁₀₀ و AH₅₀) استفاده از کود آلی هیدرولیزات ذرت است که هم دارای عنصر روی بوده که به طور مستقیم در اختیار گیاه قرار می گیرد و هم حاوی



ترکیبات نیتروژنی آلی، اسیدهای آمینه و ترکیبات کلات‌کننده طبیعی است که می‌توانند به‌طور مستقیم با روی پیوند برقرار کرده آن را کلات و از تثبیت شدن در خاک حفظ کنند. همچنین باعث بهبود ساختار، خصوصیات شیمیایی و فعالیت میکروبی خاک می‌گردند که این عوامل در افزایش حلالیت و جذب روی نقش کلیدی دارند (Pandey et al., 2023). Gulser & Ayas (۲۰۱۶) نیز در پژوهشی نشان دادند مقادیر روی، مس و منگنز با کاربرد هیومیک اسید در اسفناج افزایش قابل توجهی نسبت به شاهد داشت که این امر ناشی از بهبود خصوصیات شیمیایی خاک، افزایش فراهمی عناصر در محلول خاک و تسهیل جذب ریشه‌ای عناصر ریزمغذی گزارش شده است.

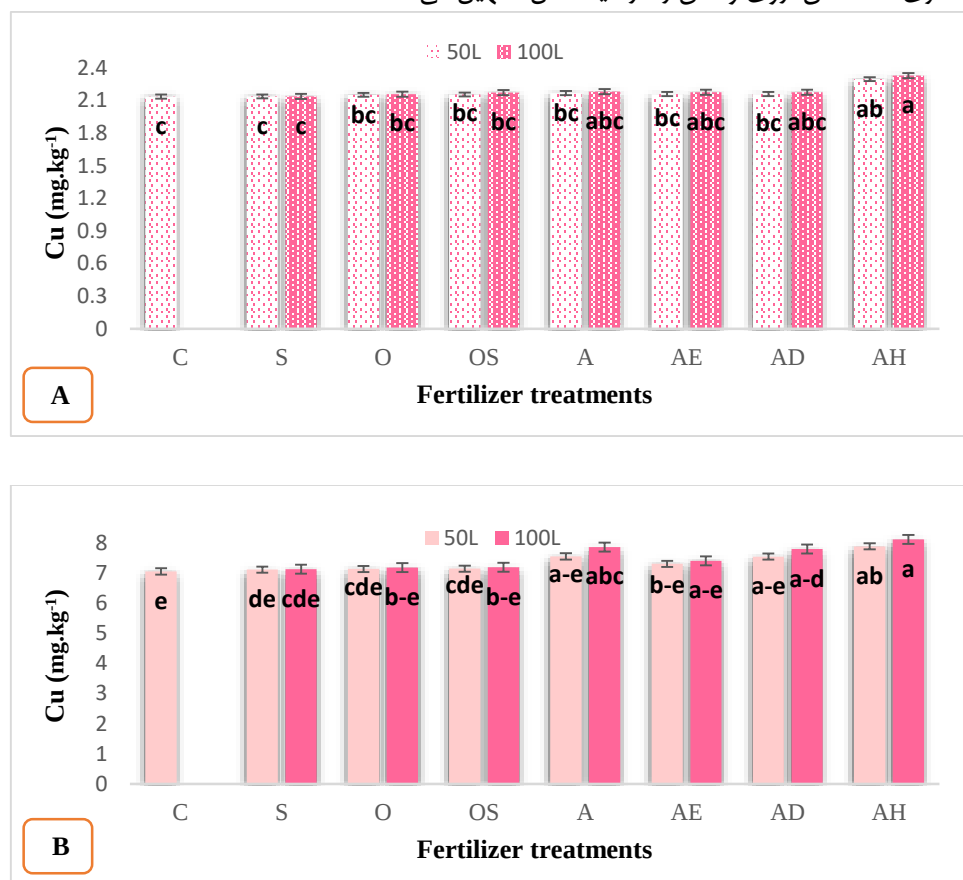


شکل ۳. اثر تیمارها و سطوح کودی بر غلظت روی در خاک (میلی گرم در کیلوگرم خاک) (A) و اندام هوایی (میلی گرم در کیلوگرم ماده خشک) (B) گیاه ذرت. حروف متفاوت در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون LSD معنی-دار هستند.

مس

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر تیمارهای مختلف کودی بر غلظت مس در خاک و اندام هوایی ذرت به ترتیب در سطح احتمال پنج و یک درصد معنی‌دار بود. در مقابل، اثر سطوح مصرف کود و اثر متقابل نوع کود آلی و میزان کاربرد آن بر غلظت مس در خاک و اندام هوایی معنی‌دار نبود. اثر اصلی سطوح کودی در خاک و گیاه معنی‌دار نبود در حالی که نوع کود تأثیر معنی‌داری بر غلظت مس در خاک و اندام هوایی گیاه داشت (جدول ۴). بیشترین میزان مس در خاک مربوط به تیمار AH100 با میانگین ۲/۳۳ میلی گرم در کیلوگرم بود (شکل ۴-۴) که نسبت به شاهد افزایش ۹ درصدی نشان داد. در اندام هوایی ذرت نیز تیمارهای AH100، AH50 و AD100 بالاترین مقدار مس را داشتند و به ترتیب موجب افزایش ۱۵، ۱۱/۹ و ۱۰/۶ درصدی نسبت به شاهد شدند (شکل ۴-۴B). افزایش نسبی غلظت مس را می‌توان ناشی از تأثیر مثبت کودهای آلی در بهبود ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک و ارتقای دسترسی گیاه به عناصر ریزمغذی دانست. ترکیبات آلی فعال موجود در این کودها با افزایش فعالیت میکروبی خاک، به آزادسازی بیشتر مس از فرم‌های غیرقابل جذب و افزایش قابلیت دسترسی آن برای گیاه کمک می‌کنند. مطالعه‌ی Roussos و همکاران (۲۰۱۷) نیز نشان داد که استفاده از کودهای آلی در دو رقم زیتون باعث افزایش قابل توجه غلظت مس در خاک شد. آن‌ها علت این پدیده را توانایی مواد آلی در تشکیل کمپلکس‌های پایدار با فلزات، به‌ویژه در خاک‌های آهکی و قلیایی عنوان کردند، محیط‌هایی که معمولاً ظرفیت بالایی برای جذب فلزات دارند. این کمپلکس‌ها مانع تثبیت بیش از حد مس شده و آن را در فرم‌های قابل جذب برای گیاه حفظ می‌کنند، در نتیجه موجب بهبود تغذیه مس در ریشه‌های زیتون می‌شوند. این

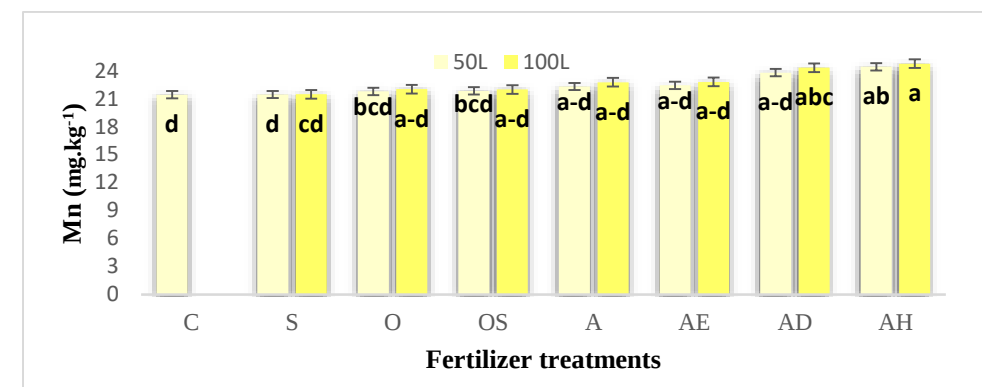
سازوکار نقش مهمی در افزایش کارایی کودهای آلی برای بهبود جذب ریزمغذی‌ها در خاک‌های آهنی دارد. به‌علاوه، در پژوهش دیگری Akladios & Mohamed (۲۰۱۸) گزارش کردند که مصرف خاکی اسید هیومیک با کاهش pH و افزایش فعالیت میکروارگانیسم‌های خاک، رهاسازی عناصری مانند آهن، روی و مس را در گیاه فلفل تسهیل می‌کند.



شکل ۴. اثر تیمارها و سطوح کودی بر غلظت مس در خاک (A) و اندام هوایی (میلی گرم در کیلوگرم ماده خشک) (B) گیاه ذرت. حروف متفاوت در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون LSD معنی‌دار هستند.

مנגنز

نتایج تجزیه واریانس جدول ۴ نشان داد اثر نوع، سطوح کودی و اثر متقابل آن‌ها بر غلظت مگنیز در خاک معنی‌دار نبود در حالی که اثر نوع کود بر غلظت مگنیز در اندام هوایی ذرت در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود به طوری که نتایج مربوط به مقایسه میانگین اثرات اصلی نشان داد سطوح مصرفی کود در خاک و گیاه اثر معنی‌داری نداشت همچنین اثر نوع کود بر غلظت مگنیز در خاک بی‌معنی بود (جدول ۵). اما در اندام هوایی گیاه استفاده از تیمارهای مختلف کودی باعث افزایش غلظت مگنیز نسبت به تیمار شاهد شده است. به طوری که مقدار مگنیز در تیمارهای AH₁₀₀ و AD₁₀₀ نسبت به شاهد به ترتیب ۱۵/۵ و ۱۴ درصد افزایش یافته که از نظر آماری نیز معنی‌دار است. بیشترین میزان مگنیز (۲۴/۷۵ میلی گرم بر کیلوگرم) مربوط به تیمار (AH₁₀₀) در سطح کودی ۱۰۰ لیتر در هکتار بوده است. یکی از مهم‌ترین مکانیسم‌های اثر کودهای آلی، کاهش موضعی pH خاک است که باعث تغییر شکل شیمیایی مواد مغذی و افزایش حلالیت و قابلیت جذب آن‌ها می‌شود. به عنوان مثال، کاهش pH می‌تواند فلزات ریزمغذی مانند مگنیز را به شکل‌های قابل جذب‌تری تبدیل کند، در نتیجه گیاهان بهتر قادر به استفاده از این عناصر خواهند بود (Sahni et al., 2008). کاهش pH در خاک‌های قلیایی که معمولاً دارای pH بالا و شرایط قلیایی هستند، باعث افزایش حل‌پذیری و فراهمی عناصر روی، مس، آهن و مگنیز می‌شود، چرا که این عناصر در pH بالا به صورت ترکیبات نامحلول باقی می‌مانند و در دسترس گیاه نیستند، اما کاهش pH باعث تبدیل آن‌ها به اشکال یونی قابل جذب می‌شود (Setia et al., 2004). از طرفی کودهای آلی با آزادسازی تدریجی عناصر غذایی، تأمین نیتروژن، فسفر، پتاسیم، گوگرد و همچنین عناصر ریزمغذی مانند آهن، روی و مگنیز را فراهم می‌کنند. این رهاسازی کنترل‌شده از مواد مغذی، موجب افزایش کارایی جذب عناصر توسط گیاه و کاهش تلفات ناشی از آبشویی می‌شود (Rastogi et al., 2023).



شکل ۵. اثر تیمارها و سطوح کودی بر غلظت منگنز در اندام هوایی گیاه ذرت (میلی گرم در کیلوگرم ماده خشک). حروف متفاوت در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون LSD معنی دار هستند.

نیترژن

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر تیمارهای مختلف کود آلی بر غلظت نیترژن در خاک و اندام هوایی گیاه ذرت به ترتیب در سطح احتمال پنج و یک درصد معنی دار بود (جدول ۶). مقایسه میانگین اثرات اصلی نشان داد اثر سطوح کودی بر غلظت نیترژن در خاک و گیاه معنی دار نشد (جدول ۷). به طور کلی غلظت نیترژن گیاه در محدوده ۱/۹۵ تا ۲/۲۹ درصد متغیر بود (شکل ۶-۷) و بیشترین میانگین غلظت نیترژن در اندام هوایی در تیمار AH₁₀₀ و AD₁₀₀ بود که به ترتیب ۱۷/۷ و ۱۲ درصد نسبت به شاهد افزایش نشان داد و در خاک نیز غلظت نیترژن در تیمار AH₁₀₀ نسبت به شاهد افزایش معنی داری را نشان داد. همچنین نتایج نشان داد اثر سطوح مختلف مصرف کود بر غلظت نیترژن در اندام هوایی در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود در حالی که اثر سطوح مختلف مصرف کود بر غلظت نیترژن در خاک معنی دار نبود. طبق جدول ۷ اثر متقابل نوع کود و سطوح کودی بر غلظت نیترژن در خاک و اندام هوایی معنی دار نبود. آهن در آنزیم‌های مرتبط با متابولیسم نیترژن مانند نیترات ردوکتاز و نیتريت ردوکتاز نقش دارد، در شرایط کمبود آهن، فعالیت نیترات ردوکتاز کاهش می‌یابد، در حالی که سطح گلوتامین سنتتاز و گلوتامات سنتتاز افزایش می‌یابد. به‌طوری که Borlotti و همکاران (۲۰۱۲) نشان دادند که کمبود آهن سبب کاهش ۳۵ درصدی میزان نیترژن در برگ‌های خیار شده است. همچنین نشان داده شده است که کاربرد آهن در هنگام کمبود نیترژن سبب افزایش میزان نیترژن شده است (Shi et al., 2012). از طرفی پروتئین‌های هیدرولیز شده (مانند کود آلی مورد استفاده در این پژوهش) نقش مهمی در افزایش جذب نیترژن توسط گیاهان دارند. این ترکیبات شامل اسیدهای آمینه و پپتیدهای کوچک هستند که به‌عنوان منابع نیترژن قابل دسترس برای گیاه عمل می‌کنند و می‌توانند از طریق ریشه یا برگ به‌سرعت جذب شوند، بدون اینکه گیاه نیاز داشته باشد نیترژن را به فرم معدنی تبدیل کند (Sobucki et al., 2019). همچنین اسیدهای آمینه و پپتیدهای موجود در پروتئین‌های هیدرولیز شده می‌توانند میکروارگانیسم‌های خاک را تغذیه کرده و فعالیت میکروبی را افزایش دهند که منجر به معدنی شدن نیترژن آلی و آزادسازی فرم‌های قابل جذب نیترژن می‌شود (Cannata et al., 2024). همچنین نتایج مشابهی توسط (Colla et al., 2014) گزارش شد. آن‌ها اثر پروتئین گیاهی هیدرولیزی حاوی اسیدهای آمینه و پپتیدهای کوتاه زنجیر را بر فعالیت شبه‌هورمونی، جذب نیترژن و تحریک رشد ذرت، گوجه‌فرنگی و نخودفرنگی را بررسی کردند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که این هیدرولیز پروتئین با ایجاد فعالیت شبه‌هورمونی (شامل فعالیت شبه‌اکسین و جیبرلین)، گسترش سیستم ریشه و تقویت فرایند جذب نیترژن، موجب افزایش کارایی جذب نیترژن و در نهایت بهبود عملکرد و جذب بیشتر نیترژن می‌شود.

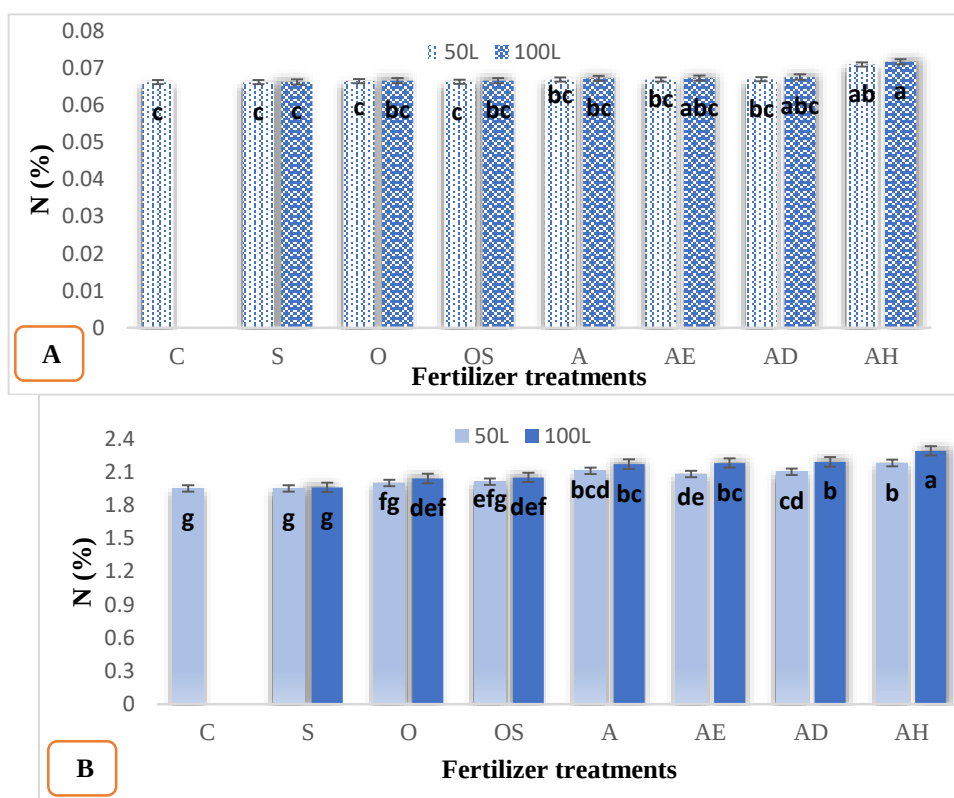
جدول ۶. نتایج تجزیه واریانس اثر نوع کود، سطوح کودی و اثر متقابل آنان بر غلظت نیترژن، فسفر و پتاسیم در خاک و گیاه ذرت.

منابع تغییرات	درجه آزادی	نیترژن خاک	فسفر خاک	پتاسیم خاک	نیترژن گیاه	فسفر گیاه	پتاسیم گیاه
		درصد	میلی گرم در کیلوگرم خاک	درصد	درصد	درصد	درصد
نوع کود	۷	۰/۰۰۰۰۳*	۰/۹۷*	۲۷۵/۸۴*	۰/۰۶**	۰/۰۰۰۹**	۰/۰۷**
سطوح کودی	۱	۰/۰۰۰۰۰۹ ns	۰/۰۵ ns	۱۸/۵۹ ns	۰/۰۴**	۰/۰۰۰۱ ns	۰/۰۳ ns
اثر متقابل نوع کود و سطوح کودی	۷	۰/۰۰۰۰۰۱ ns	۰/۰۰۷ ns	۲/۴۹ ns	۰/۰۰۲ ns	۰/۰۰۰۶ ns	۰/۰۰۳ ns
خطا	۳۲	۰/۰۰۰۰۰۷	۰/۴	۱۰۱/۹۷	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۱	۰/۰۲
ضریب تغییرات (%)	-	۳/۹	۶/۰۳	۳/۹	۲/۲	۴/۹۴	۷/۲

* و ** معنی دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و ns غیرمعنی دار

جدول ۷. میانگین اثرات اصلی سطوح کودی و نوع کود بر غلظت عناصر نیتروژن (درصد)، فسفر و پتاسیم در خاک (میلی گرم در کیلوگرم خاک) و گیاه (درصد)

نوع کود	نیتروژن خاک	فسفر خاک	پتاسیم خاک	نیتروژن گیاه	فسفر گیاه	پتاسیم گیاه
درصد	میلی گرم در کیلوگرم خاک	درصد	میلی گرم در کیلوگرم خاک	درصد	درصد	درصد
C	۰/۰۶۶۲ B	۱۰/۴۴ B	۲۵۱/۷۷ B	۱/۹۵ D	۰/۲۱۴ C	۱/۹۳۲ C
S	۰/۰۶۶۲ B	۱۰/۴۶ B	۲۵۱/۸۱ B	۱/۹۵ D	۰/۲۱۴ C	۱/۹۳۴ C
O	۰/۰۶۶۶ B	۱۰/۴۷ B	۲۵۲/۴۶ B	۲/۰۲ C	۰/۲۲۸ B	۱/۹۶۷ C
OS	۰/۰۶۶۵ B	۱۰/۴۸ B	۲۵۲/۵۸ B	۲/۰۳ C	۰/۲۲۸ B	۱/۹۷۱ BC
A	۰/۰۶۷۰ B	۱۰/۹۲ AB	۲۵۴/۴۷ B	۲/۱۴ B	۰/۲۲۹ B	۲/۰۴۹ BC
AE	۰/۰۶۷۱ B	۱۰/۹۴ AB	۲۵۵/۶۶ B	۲/۱۳ B	۰/۲۳۰ B	۲/۰۶۲ BC
AD	۰/۰۶۷۳ B	۱۰/۹۷ AB	۲۵۶/۰۶ B	۲/۱۴ B	۰/۲۳۱ B	۲/۱۴۳ AB
AH	۰/۰۷۱۴ A	۱۱/۵۸ A	۲۷۲/۱۲ A	۲/۲۴ A	۰/۲۵۴ A	۲/۲۴۷ A
سطح کود						
۱۰۰	۰/۰۶۷۴ A	۱۰/۸۲ A	۲۵۶/۴۹ A	۲/۱۰ A	۰/۲۳۰ A	۲/۰۵۷ A
۵۰	۰/۰۶۷۲ A	۱۰/۷۵ A	۲۵۵/۲۴ A	۲/۰۵ A	۰/۲۲۷ A	۲/۰۱۹ A

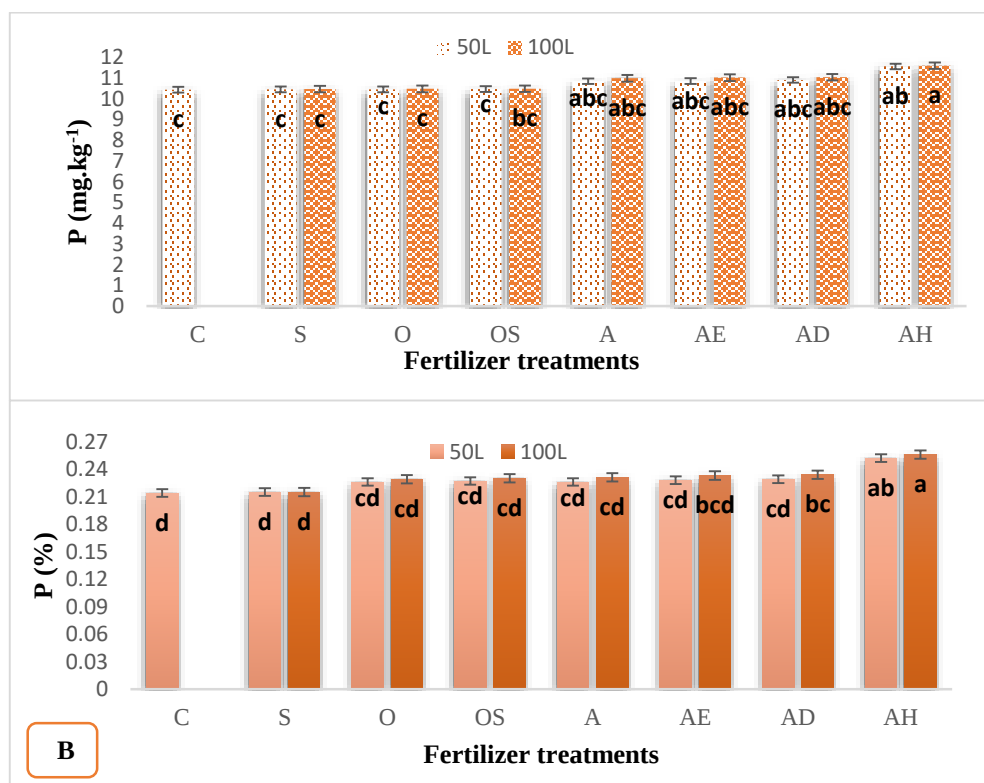


شکل ۶. اثر تیمارها و سطوح کودی بر غلظت نیتروژن در خاک (درصد) (A) و اندام هوایی (درصد) (B) گیاه ذرت. حروف متفاوت در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون LSD معنی دار هستند.

فسفر

نتایج تجزیه واریانس داده‌های حاصل از آزمایش (جدول ۶) نشان داد که غلظت فسفر قابل دسترس خاک در سطح احتمال ۵ درصد تحت تأثیر نوع کود آلی قرار داشت در حالی که سطوح مصرف کود و اثر متقابل آن‌ها معنی دار نبود. مقایسه میانگین‌ها (شکل ۷) نشان داد که استفاده از تمامی تیمارهای کودی، در هر دو سطح ۵۰ و ۱۰۰ لیتر در هکتار، موجب افزایش غلظت فسفر نسبت به تیمار شاهد شد؛ هرچند

برخی از این افزایش‌ها از نظر آماری معنی‌دار نبودند. بیش‌ترین غلظت فسفر قابل دسترس مربوط به تیمار AH_{100} بود که نسبت به شاهد حدود ۱۱/۱ درصد افزایش نشان داد. غلظت فسفر در اندام هوایی در سطح احتمال یک درصد تحت تأثیر نوع کود قرار داشت در حالی که تأثیر سطوح مصرفی کود و اثر متقابل نوع کود و سطوح مصرفی آن بر غلظت فسفر اندام هوایی معنی‌دار نشد. نتایج مقایسه میانگین در شکل (B-۷) نشان داد بیشترین غلظت فسفر مربوط به تیمارهای AH_{100} و AH_{50} (به ترتیب ۰/۲۵۶ و ۰/۲۵۲ درصد) است که نسبت به شاهد معنی‌دار بوده و به ترتیب ۱۹/۲ و ۱۷/۲ درصد افزایش را نشان دادند. کود آلی استفاده شده حاوی فسفر است که آن را در اختیار گیاه قرار داده و از طرفی فسفر برهمکنش مثبت و معنی‌داری با جذب نیتروژن و رشد گیاه دارد. این دیدگاه رایج است که افزایش رشد به مقدار بیشتری از نیتروژن و فسفر نیاز دارد، استنباط این است که اثرات هم‌افزایی متقابل منجر به تحریک رشد و افزایش جذب هر دو عنصر می‌شود (Sumner & Farinam, 1986). از طرفی ترکیبات آلی اسیدی (مانند اسید لاکتیک) و منابع کربنی قابل تجزیه موجود در کود آلی، با دو مکانیسم اصلی شامل کاهش موضعی pH که باعث حل شدن فسفات‌های نامحلول کلسیم، آهن و آلومینیوم می‌شود و تحریک فعالیت میکروبی که منجر به ترشح اسیدهای آلی و آنزیم‌های فسفاتاز توسط ریزجانداران خاک و در نهایت، معدنی‌سازی و رها سازی فسفر از ذخایر آلی و معدنی پیش از این غیرقابل دسترس می‌گردد. Karazija و همکاران (۲۰۱۵) بیان کردند که اسیدهای آلی به‌عنوان محصول تجزیه مواد آلی، سبب افزایش قابلیت دسترس‌ی عناصر علی‌الخصوص فسفر و عناصر کم مصرف می‌شوند. آهن کلات شده منجر به افزایش ویژگی‌های رشد رویشی و عملکرد شد. دلیل این امر، تأثیر آهن در ساخت کلروفیل و پروتئین‌های حاوی آهن است که منجر به افزایش راندمان فتوسنتز می‌شوند که در افزایش سرعت رشد گیاه منعکس می‌شود در نتیجه رشد بیشتر باعث جذب بیشتر عناصر غذایی مانند فسفر می‌شود (Ahmed, 2016).

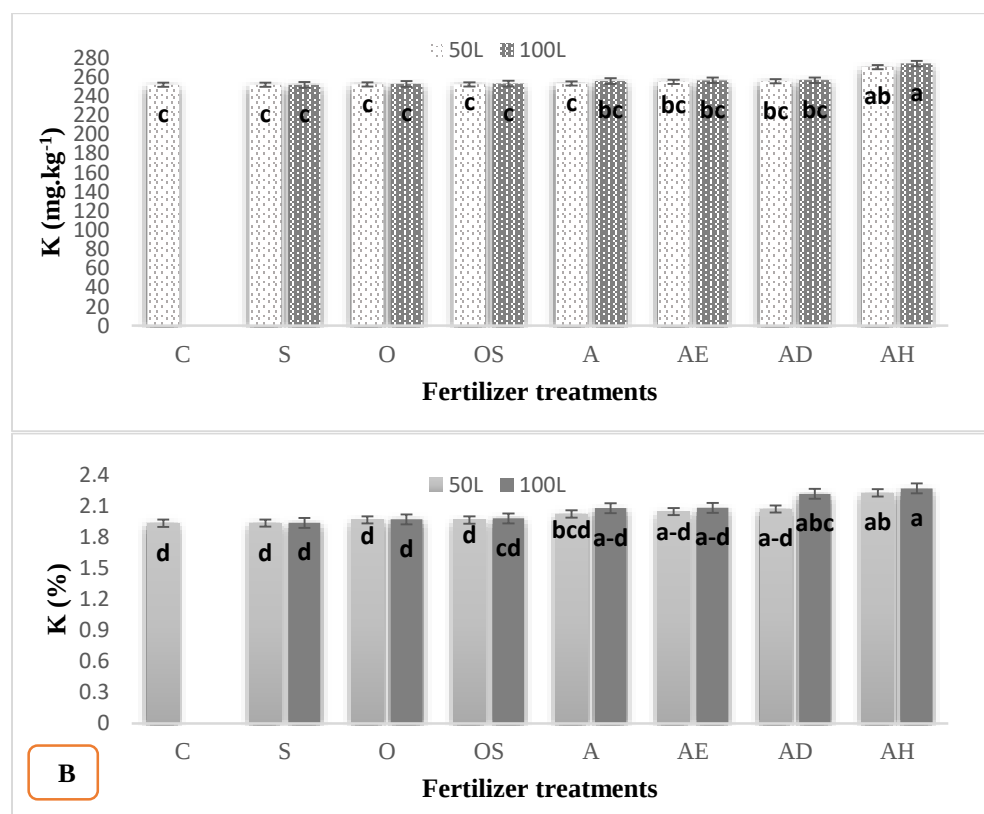


شکل ۷. اثر تیمارها و سطوح کودی بر غلظت فسفر در خاک (میلی گرم در کیلوگرم خاک) (A) و اندام هوایی (درصد) (B) گیاه ذرت. حروف متفاوت در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون LSD معنی‌دار هستند.

پتاسیم

نتایج تجزیه واریانس نشان داد کاربرد خاکی کودهای آلی مختلف بر غلظت پتاسیم در خاک و گیاه به ترتیب در سطح احتمال پنج و یک درصد اثر معنی‌داری داشت. در حالی که سطوح مصرفی کودها و اثر متقابل نوع کود و سطوح مصرفی بر غلظت فسفر در خاک و گیاه اثر معنی‌داری نداشتند (جدول ۶). نتایج مقایسه میانگین‌ها (شکل A-۸) نشان داد بیشترین میانگین غلظت پتاسیم محلول در خاک به میزان

۰/۰۲۷۴ درصد با افزودن ۱۰۰ لیتر بر هکتار در تیمار AH₁₀₀ به دست آمد و کمترین مقدار آن در تیمار شاهد (C) با مقدار ۰/۰۲۵۲ بود که افزایش ۸/۸ درصد نسبت به شاهد را نشان می‌دهد. مقایسه میانگین (شکل ۸-B) غلظت پتاسیم در اندام هوایی نشان داد بیشترین میانگین مربوط به تیمارهای AH₁₀₀، AH₅₀ و AD₁₀₀ با میانگین ۲/۲۷، ۲/۲۳ و ۲/۲۲ درصد بود که نسبت به شاهد به ترتیب ۱۷/۴، ۱۵/۱ و ۱۴/۶ درصد افزایش نشان دادند. با توجه به اینکه خاک محل آزمایش دارای pH بالایی بود و در چنین وضعیتی گیاه از نظر عناصر غذایی در تعادل نمی‌باشد و کمبود عناصر ضروری نظیر آهن مشاهده می‌شود، به نظر می‌رسد گیاهان تیمار شده با کودهای آلی مایع غنی از آهن وضعیت تغذیه متعادلی داشته‌اند. این امر سبب بهبود سیستم فتوسنتزی گیاه شده که نتیجه آن تولید انرژی بیشتر است و از این طریق غلظت عناصری مانند پتاسیم را که به صورت فعال و با صرف انرژی جذب گیاه می‌شوند، افزایش داده است. از سوی دیگر، حضور ترکیبات آلی در این کودها می‌تواند با کاهش تثبیت شدن پتاسیم در خاک و افزایش تبادل یونی، جذب این عنصر حیاتی را تسهیل کند، همچنین کاربرد تیمارهای کودی به‌ویژه کودهای آلی غنی از پتاسیم، نقش مهمی در افزایش غلظت پتاسیم محلول ایفا کردند. Kazemi (۲۰۱۴) گزارش داد، محلول‌پاشی با اسید هیومیک منجر به افزایش قابل توجه محتوای نیتروژن و پتاسیم برگ‌های گوجه‌فرنگی شد. در پژوهش Yu و همکاران (۲۰۲۵) تیمارهای جایگزین ۱۵ و ۳۰ درصد کود آلی بجای کود شیمیایی باعث بهبود وضعیت حاصلخیزی خاک از طریق افزایش میزان ماده آلی، نیتروژن کل، پتاسیم کل و فسفر قابل جذب نسبت به تیمار کود شیمیایی کامل شدند.



شکل ۸. اثر تیمارها و سطوح کودی بر غلظت پتاسیم در خاک (میلی گرم در کیلوگرم خاک) (A) و اندام هوایی (درصد) (B) گیاه ذرت. حروف متفاوت در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون LSD معنی‌دار هستند.

کلسیم

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر تیمارهای مختلف کودی بر غلظت کلسیم در خاک و اندام هوایی ذرت به ترتیب در سطح احتمال پنج و یک درصد معنی‌دار بود. در حالی که تأثیر سطوح مصرف کود و اثر متقابل نوع کود آلی و سطح مصرف آن بر غلظت کلسیم در خاک و اندام هوایی ذرت معنی‌دار نبود (جدول ۸). نتایج مقایسه میانگین (شکل ۹-A) نشان داد حداکثر غلظت کلسیم در خاک در تیمار AH₁₀₀ (۲۳۸۷/۵ میلی گرم به کیلوگرم خاک) بود که ۹/۱ درصد نسبت به شاهد افزایش نشان داد و اختلاف معنی‌داری با تیمار شاهد داشت. همچنین در بخش اندام هوایی حداکثر غلظت کلسیم مربوط به تیمارهای AH₁₀₀، AH₅₀ و AD₁₀₀ با میانگین ۰/۳۳۹، ۰/۳۳۵ و ۰/۳۱۴ بود که نسبت به شاهد (۰/۲۸۹ درصد) به ترتیب ۱۷/۶، ۱۵/۹ و ۸/۸ درصد افزایش یافته و با آن اختلاف معنی‌داری داشتند (شکل



(B-۹). غلظت کلسیم و منیزیم در خاک بسیار بیشتر از آهن است و بنابراین کمپلکس‌های آن‌ها با لیگاندها ممکن است از نظر کمی غالب باشند. همچنین با افزایش محتوای نیتروژن، رشد افزایش یافته و در نتیجه، تقاضا برای سایر عناصر غذایی افزایش می‌یابد (Fageria et al., 2001).

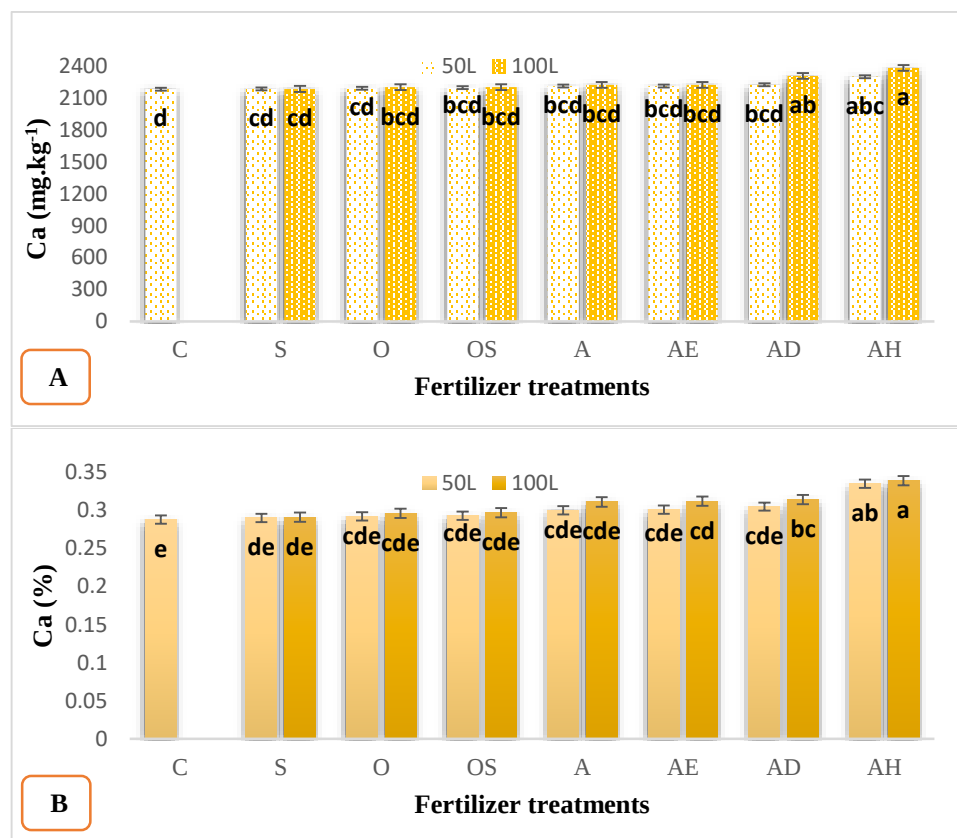
جدول ۸. نتایج تجزیه واریانس اثر نوع کود، سطوح کودی و اثر متقابل آنان بر غلظت عناصر کلسیم، منیزیم و سدیم در خاک و گیاه ذرت.

منابع تغییرات	درجه آزادی	کلسیم خاک	منیزیم خاک	سدیم خاک	کلسیم گیاه	منیزیم گیاه	سدیم گیاه
میلی گرم در کیلوگرم خاک							
درصد							
نوع کود	۷	۱۷۴۴۰ ^{**}	۶۹/۵۰ ^{**}	۰/۹۱ ^{ns}	۰/۰۰۱ ^{**}	۰/۰۰۳ ^{**}	۰/۰۰۰۰۰۹ ^{ns}
سطوح کودی	۱	۷۶۶۷ ^{ns}	۱۹/۰۰۲ ^{ns}	۰/۷۳ ^{ns}	۰/۰۰۳ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۵ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۰۸ ^{ns}
اثر متقابل نوع کود و سطوح کودی	۷	۱۹۵۱ ^{ns}	۴/۵۱ ^{ns}	۰/۰۵ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۲ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۴ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۰۱ ^{ns}
خطا	۳۲	۴۸۸۵	۱۵/۹۷	۲/۹۶	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۶	۰/۰۰۰۰۰۶ ^{ns}
ضریب تغییرات (%)	-	۳/۱	۲/۹	۴/۴	۴/۵	۴/۸	۹/۵۰

* و ** معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و ^{ns} غیرمعنی‌دار

جدول ۹. میانگین اثرات اصلی سطوح کودی و نوع کود بر غلظت عناصر کلسیم، منیزیم و سدیم در خاک (میلی گرم در کیلوگرم خاک) و گیاه (درصد)

نوع کود	کلسیم خاک	منیزیم خاک	سدیم خاک	کلسیم گیاه	منیزیم گیاه	سدیم گیاه
میلی گرم در کیلوگرم خاک						
درصد						
C	۲۱۸۷/۸۵ C	۱۳۱/۶۲ B	۳۸/۶۲ A	۰/۲۸۹ D	۰/۱۵۳ D	۰/۰۲۶۵ A
S	BC ۲۱۸۹/۵۴	۱۳۱/۶۷ B	۳۸/۶۵ A	۰/۲۹۱ CD	۰/۱۵۴ CD	۰/۰۲۶۴ A
O	BC ۲۲۰۰/۵۹	۱۳۱/۹۴ B	۳۹/۰۱ A	۰/۲۹۴ BCD	۰/۱۵۵ CD	۰/۰۲۶۲ A
OS	BC ۲۲۰۲/۸۱	۱۳۲/۱۱ B	۳۹/۰۷ A	۰/۲۹۵ BCD	۰/۱۵۶ CD	۰/۰۲۶۲ A
A	BC ۲۲۲۱/۳۰	۱۳۳/۷۲ B	۳۹/۳۸ A	۰/۳۰۶ BC	۰/۱۶۳ BC	۰/۰۲۶۰ A
AE	BC ۲۲۲۱/۷۶	۱۳۳/۹۸ B	۳۹/۴۱ A	۰/۳۰۷ B	۰/۱۶۱ BCD	۰/۰۲۵۹ A
AD	AB ۲۲۷۰/۴۰	۱۳۶/۲۴ B	۳۹/۴۹ A	۰/۳۱۰ B	۰/۱۶۹ AB	۰/۰۲۵۸ A
AH	۲۳۴۶/۴۲ A	۱۴۱/۵۶ A	۳۹/۹۴ A	۰/۳۳۷ A	۰/۱۷۴ A	۰/۰۲۵۲ A
سطح کود						
۱۰۰	۲۲۴۲/۷۲ A	۱۳۴/۷۳ A	۳۹/۳۵ A	۰/۳۰۶ A	۰/۱۶۲ A	۰/۰۲۶۲ A
۵۰	۲۲۱۷/۴۴ A	۱۳۳/۴۸ A	۳۹/۰۴ A	۰/۳۰۱ A	۰/۱۶۰ A	۰/۰۲۵۹ A



شکل ۹. اثر تیمارها و سطوح کودی بر غلظت کلسیم در خاک (میلی گرم در کیلوگرم خاک) (A) و اندام هوایی (درصد) (B) گیاه ذرت. حروف متفاوت در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون LSD معنی دار هستند.

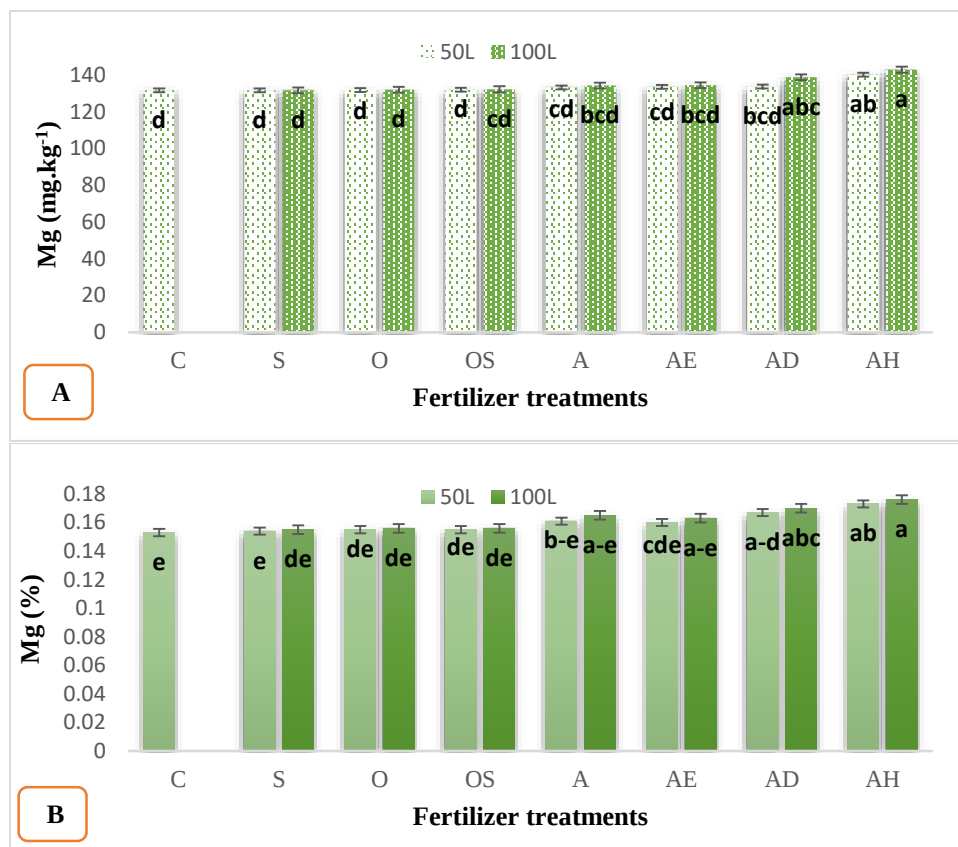
منیزیم

نتایج تجزیه واریانس نشان داد کاربرد تیمارهای مختلف کود آلی اثر معنی داری بر غلظت منیزیم محلول در خاک و اندام هوایی گیاه داشت، به طوری که در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود. اما سطوح مصرفی و اثر متقابل نوع کود و سطوح مصرفی آن بر غلظت منیزیم خاک و اندام هوایی ذرت تأثیر معنی داری ایجاد نکرد (جدول ۸). نتایج مقایسه میانگین‌ها نیز نشان داد کاربرد تیمارهای AH₅₀ و AH₁₀₀ سبب افزایش ۸/۶ و ۶/۵ درصدی غلظت منیزیم محلول در خاک در مقایسه با شاهد شد (شکل ۱۰-A). بیشترین میانگین غلظت منیزیم محلول در خاک به میزان ۱۴۲/۹ میلی گرم در کیلوگرم خاک با افزودن ۱۰۰ لیتر بر هکتار کود AH₁₀₀ به دست آمد. حداکثر غلظت منیزیم در اندام هوایی ذرت در تیمارهای AH₁₀₀، AH₅₀ و AD₁₀₀ بود که اختلاف معنی داری با تیمار شاهد داشتند و غلظت منیزیم در اندام هوایی ذرت را به ترتیب ۱۴/۶، ۱۲/۴ و ۱۱ درصد نسبت به شاهد افزایش دادند (شکل ۱۰-B). این نتایج با نتایج Navarro-Morillo و همکاران (۲۰۲۳) مطابقت داشت که گزارش کردند کاربرد کود آلی مایع حاصل از فرآوری ذرت موجب افزایش غلظت برخی عناصر غذایی نظیر فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیم و گوگرد در مقایسه با گیاهان شاهد گردیده است. همچنین Ali و همکاران (۱۹۹۸) گزارش دادند که کاربرد ۲۵ میلی گرم آهن بر کیلوگرم منجر به افزایش قابل توجه غلظت نیتروژن، فسفر، پتاسیم، روی، مس و منیزیم شد.

سدیم

نتایج حاصل از این پژوهش تجزیه نشان داد کاربرد خاکی کودهای آلی مایع غنی شده با منابع مختلف آهن، سطوح مصرف کود و اثر متقابل آن‌ها اثر معنی داری بر غلظت سدیم محلول در خاک و اندام هوایی ذرت نداشتند (جدول ۸)، همچنین مقایسه میانگین نشان داد اثر اصلی نوع و سطوح کودی بر غلظت سدیم در خاک پس از برداشت و اندام هوایی گیاه معنی دار نشد (جدول ۹). نتایج نشان داد کاربرد کودهای آلی در گیاه در مقایسه با شاهد سبب افزایش ۲/۹ درصدی غلظت سدیم محلول در خاک شد اما این افزایش از نظر آماری معنی دار نبود. همچنین کاربرد خاکی ۱۰۰ لیتر در هکتار از تیمارهای AH₁₀₀ و AD₁₀₀ سبب کاهش ۶/۱ و ۳/۵ درصدی غلظت سدیم در اندام هوایی ذرت در مقایسه با شاهد شد، اگرچه این کاهش معنی دار نبود. بیشترین میانگین غلظت سدیم در اندام هوایی ذرت به میزان ۰/۰۲۶ درصد

در تیمار شاهد به دست آمد. به طور کلی، آهن یک ریزمغذی ضروری است که نقش‌های فراوانی را در تعداد زیادی از واکنش‌های بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی در گیاهان ایفا می‌کند. رقابت بین جذب سدیم و آهن منجر به جریان محدود سدیم توسط ریشه‌های ذرت می‌شود (Alsamadany et al., 2024). همچنین از آنجایی که در جذب پتاسیم و سدیم در گیاه حالت رقابتی وجود دارد، بنابراین با مهیا بودن انرژی کافی در گیاه، جذب پتاسیم افزایش یافته که این امر موجب کاهش جذب عنصر سدیم در گیاه شد.



شکل ۱۰. اثر تیمارها و سطوح کودی بر غلظت منیزیم در خاک (میلی گرم در کیلوگرم خاک) (A) و اندام هوایی (درصد) (B) گیاه ذرت. حروف متفاوت در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون LSD معنی دار هستند.

وزن تر و خشک اندام هوایی

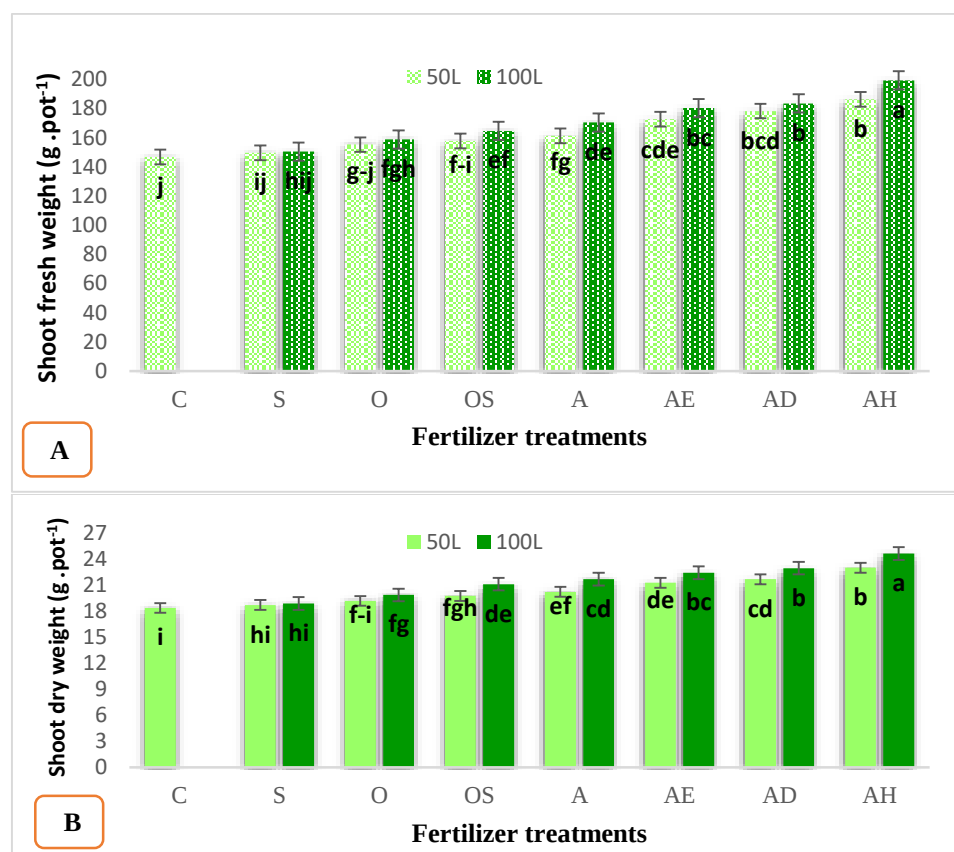
نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر تیمارهای مختلف کود و سطوح مصرف آن بر وزن تر و خشک اندام هوایی ذرت در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود، در حالی که اثر متقابل نوع کود آلی و میزان مصرف آن بر این شاخص‌ها معنی دار تشخیص داده نشد (جدول ۱۰). بر اساس نتایج مقایسه میانگین‌ها (شکل ۱۱)، کلیه تیمارهای کودی در مقایسه با شاهد (C) موجب افزایش وزن تر و خشک اندام هوایی ذرت شدند، اگرچه این افزایش‌ها در برخی تیمارها از نظر آماری معنی دار نبود. بیشترین وزن تر اندام هوایی به ترتیب در تیمارهای AH₁₀₀، AH₅₀ و AD₁₀₀ مشاهده شد که به ترتیب دارای میانگین ۱۹۹/۲۶، ۱۸۶/۲۵ و ۱۸۳/۴۵ گرم در هر گلدان بودند و نسبت به تیمار شاهد به میزان ۳۵/۸، ۲۶/۹ و ۲۵ درصد افزایش نشان دادند. کمبود آهن در گیاه، در فعالیت میتوکندری اختلال ایجاد می‌کند و این اختلال سبب کاهش تولید ATP و در نهایت انرژی می‌شود و همه‌ی این عوامل موجب کاهش رشد و عملکرد گیاه می‌گردند. از نقش‌های آهن که سبب افزایش رشد رویشی می‌شود، تثبیت نیتروژن است. نقش مهم دیگر آهن که سبب افزایش رشد رویشی در گیاهان می‌شود، شرکت در فتوسنتز است. آهن یک عنصر ضروری در بافت‌های فتوسنتزی است که در کمپلکس‌های انتقال الکترون نقش دارد (Guerinot & Yi, 1994). در مطالعه حاضر، بهبود رشد ذرت به دلیل محتوای بالاتر آهن، نیتروژن و ریزمغذی‌ها در برگ‌های گیاه است. غلظت P، N، Fe، K، Ca و Mg در برگ‌های گیاه با کودهای آلی غنی از آهن به طور قابل توجهی بهبود یافت. یون‌های فلزی مانند Zn، Fe، Mn و Cu برای رشد سالم گیاه ضروری هستند و برای واکنش‌های مختلف متابولیسم مورد نیاز هستند (Marschner, 2011). آن‌ها اثرات مستقیم و مشخصی بر عملکرد گیاه و همچنین بر عملکرد و پارامترهای کیفی دارند. Choi و همکاران (۲۰۲۲) در گوجه‌فرنگی و کاهو نشان دادند که استفاده

از پروتئین هیدرولیز شده می‌تواند از طریق اثر مستقیم بر فعالیت آنزیم‌های کلیدی متابولیسم نیتروژن و کربن، مانند گلوتامین سنتتاز، گلوتامات سنتتاز، نیترات ردوکتاز، نیتريت ردوکتاز، ملات دهیدروژناز، ایزوسیترات دهیدروژناز و سیترات سنتتاز، جذب مواد مغذی و به‌ویژه نیتروژن را بهبود دهد. این بهبود جذب نیتروژن به افزایش سنتز پروتئین‌ها، تولید اسیدهای آلی و بهینه‌سازی فرایندهای فتوسنتزی کمک کرده و در نهایت باعث رشد بهتر و عملکرد بالاتر گیاهان می‌شود.

جدول ۱۰. نتایج تجزیه واریانس اثر نوع کود، سطوح کودی و اثر متقابل آنان بر وزن تر و خشک اندام هوایی ذرت (گرم در گلدان).

منابع تغییرات	درجه آزادی	وزن تر اندام هوایی	وزن خشک اندام هوایی
نوع کود	۷	۱۵۲۲/۱۰**	۲۰/۶۵**
سطوح کودی	۱	۳۹۰/۸۸**	۱۱/۱۶**
اثر متقابل نوع کود و سطوح کودی	۷	۱۷/۲۸ ^{ns}	۰/۵۵ ^{ns}
خطا	۳۲	۲۸/۵۷	۰/۴۴
ضریب تغییرات (%)		۳/۲	۳/۲

* و ** معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و ^{ns} غیرمعنی‌دار



شکل ۱۱. اثر تیمارها و سطوح کودی بر وزن تر (A) و خشک (B) اندام هوایی (گرم در گلدان) گیاه ذرت. حروف متفاوت در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون LSD معنی‌دار هستند.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد کودهای آلی به‌ویژه کود آلی مایع غنی شده با Fe-EDDHA به طور معنی‌داری موجب بهبود جذب عناصر غذایی در اندام هوایی گیاه ذرت شد که این نتایج با توجه به افزایش وزن تر و خشک نشان می‌دهد این تیمار سبب بهبود عملکرد و جذب عناصر توسط گیاه گردیده است. تیمار AH در سطح ۱۰۰ لیتر در هکتار (AH₁₀₀) بهترین کارایی را نشان داد، به‌طوری‌که موجب افزایش غلظت آهن، نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیم و مس نسبت به تیمار شاهد در اندام هوایی گیاه و خاک پس از برداشت گردید؛



بنابراین، استفاده از کود آلی مایع غنی شده با Fe-EDDHA به طور معنی داری موجب بهبود رشد و وضعیت تغذیه‌ای ذرت گردید که این اثر به افزایش جذب آهن و سایر عناصر غذایی در گیاه و خاک نسبت داده می‌شود. علاوه بر این، با توجه به ترکیب این کود که حاوی مواد آلی و اسیدهای آمینه است، می‌تواند به بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک از جمله تحریک فعالیت میکروارگانیسم‌های مفید کمک کند. اگرچه نتایج این پژوهش در شرایط گلدانی به دست آمده است، اما برتری تیمار AH100 در بهبود رشد، جذب عناصر غذایی و وضعیت تغذیه‌ای گیاه نشان می‌دهد که این کود از ظرفیت مناسبی برای استفاده در شرایط مزرعه‌ای برخوردار است. با این حال، تعیین میزان دقیق تأثیر آن بر عملکرد و پایداری پاسخ گیاه مستلزم انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای در شرایط مختلف خاک و اقلیم است.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

مقاله حاضر با حمایت مالی و معنوی معاونت پژوهشی دانشگاه زنجان انجام شد.

مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در مقاله مستخرج از پایان‌نامه تقریباً به شکل زیر باشد:

احمدوند، ا: دانشجو: تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنهاد مقاله

گلچین، ا: استاد راهنمای پایان‌نامه، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله

جعفری اصل، م: استاد مشاور پایان‌نامه، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله

امانی‌فر، س: استاد مشاور پایان‌نامه، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله.

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرآیند نوشتن

نویسندگان از ابزارهای هوش مصنوعی برای نگارش این مقاله استفاده ننموده‌اند.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌ها پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

نویسندگان از دانشگاه‌های زنجان و گروه صنعتی پژوهشی فرهیختگان زرنام (پالایشگاه غلات زر) به خاطر فراهم کردن تمام امکانات مورد نیاز تشکر و قدردانی می‌کنند.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان از جعل داده‌ها، تحریف، سرقت ادبی و هرگونه تخلف اجتناب کردند.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

REFERENCES

- Ahmed, H. M. (2016). Study of the effect of foliar fertilization with chelated iron and humic acid in two sunflower cultivars. Ms thesis. *University of Diyala, Baqubah, Iraq*, 12/04/2016, 115.
- Akladios, S. A., & Mohamed, H. I. (2018). Ameliorative effects of calcium nitrate and humic acid on the growth, yield component and biochemical attribute of pepper (*Capsicum annuum*) plants grown under salt stress. *Scientia Horticulturae*, 236, 244-250.
- Ali, Z. I., Abdel Malik, E. M., Babiker, H. M., Ramraj, V. M., Sultana, A., & Johansen, C. (1998) Iron and Nitrogen Interactions in Groundnut Nutrition. *Soil Science Plant Anal*, 29, 2619-2630.
- Alsamadany, H., Anayatullah, S., Zia-ur-Rehman, M., Usman, M., Ameen, T., Alharby, H. F. & Rizwan, M. (2024). Residual efficiency of iron-nanoparticles and different iron sources on growth, and antioxidants in maize plants under salts stress: life cycle study. *Heliyon*, 10(7).

- Ana, A. F., Sonia, G. M., & Juan, J. L. (2004). Evaluation of synthetic iron (III) chelates (EDDHA/Fe³⁺, EDDHMA/Fe³⁺ and the novel EDDHSA/Fe³⁺) to correct iron chlorosis. *Europa Journal Agronomy*, 22 (2), 119–130.
- Borlotti, A., Vigani, G., & Zocchi, G. (2012). Iron deficiency affects nitrogen metabolism in cucumber (*Cucumis sativus* L.) plants. *BMC Plant Biol*, 12: 189-195.
- Bremner, J. (1996). Nitrogen total. Methods of Soil Analysis. In: D. L. Sparks et al. (Eds). Method of Soil Analysis. Part 3. pp. 1085-1121. Chemical Methods. *American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. Madison. WI. USA*.
- Cannata, C., Basile, F., La Bella, E., Arciello, S., Abreu, A. C., Fernandez, I., Leonardi, C., & Mauro, R. P. (2024). Exhausted plant cell culture media as potential biostimulants to enhance plant growth and nitrogen use efficiency in tomatoes under optimal and reduced nitrogen supply. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 187(6), 780-791.
- Choi, S., Colla, G., Cardarelli, M., & Kim, H. J. (2022). Effects of Plant-Derived Protein Hydrolysates on Yield, Quality, and Nitrogen Use Efficiency of Greenhouse Grown Lettuce and Tomato. *Agronomy*, 12(5), 1018.
- Colla, G., Roupahel, Y., Canaguier, R., Svecova, E., & Cardarelli, M. (2014). Biostimulant action of a plant-derived protein hydrolysate produced through enzymatic hydrolysis. *Frontiers in Plant Science*, 5, 448.
- Fageria, V. D. (2001). Nutrient interaction in crop plants. *Journal of Plant Nutrition*, 24: 8, 1269-1290.
- Gee, G. W., & Boder, D. (2002). Particle-size analysis. In: Dane, J. H. and G. C. Topp. (Eds.). Methods of Soil Analysis. Part 4- Physical Methods. Agronomy Monograph. No 9. *American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. Madison. WI, PP. 255-293*.
- Guerinot, M. L. & Yi, Y. (1994). Iron: Nutritious, noxious, and not readily available. *Plant Physiol*, 104: 815-820.
- Gulser, F., & Ayas, H. C. (2016). Effect of sulfur and humic acid applications on micro nutrient contents of spinach (*Spinacea oleracea* var. Spinoza). *Soil Science Society of Turkey*, 27-31.
- Gupta, R., Verma, N., & Tewari, R. K. (2024). Micronutrient deficiency-induced oxidative stress in plants. *Plant Cell Rep*, 43, 213.
- Helmke, P. A., & Sparks, D. L. (1996). Lithium, sodium, potassium, rubidium and cesium, P. 551–574, In: Sparks D.L. (ed.), Method of Soil Analysis, Part 3, Chemical Methods. No. 5, SSSA and ASA, *Madison, WI. USA*, 1996.
- Hsu, H. J. (1996). *U.S. Patent No. 5,504,055*. Washington, DC: U. S. Patent and Trademark Office.
- Jacob, R. H., Hassan, H. M. M., Afify, A. S., & gaber, G. (2021). A novel synthesis chemical characterization and biological activities of metal-leather protein hydrolysate chelate. *Frese nius Environmental Bulletin*, 30: 8717–8727.
- Karazija, T., Cosic, T., Lazarevic, B., Horvat, T., Petek, M., Palcic, I., & Jerbic, N. (2015). Effect of organic fertilizers on soil chemical properties on vineyard calcareous soil. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, 80(2), 79-84.
- Kazemi, M. (2014) Effect of foliar application of humic acid and calcium chloride on tomato growth. *Bull. Environ. Pharm. & Life Sci.* 3 (3), 41-46.
- Kobayashi, T., & Nishizawa, N. K. (2012). Iron Uptake, Translocation, and Regulation in Higher Plants. *Annu Rev Plant Biol*, 63 (1):131–152.
- Lemanceau, P., Bauer, P., Kraemer, S., & Briat, J. F. (2009). Iron dynamics in the rhizosphere as a case study for analyzing interactions between soils, plants and microbes. *Plant Soil*, 321, 513–535.
- Lindsay, W. L., & Norvell, W. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil science society of America journal*, 42(3), 421-428.
- Liu, W. L., Chen, H. N., Chen, H. K., Li, Y. P., & Zhang, L. (2016). Study on the effect of compound iron fertilizer to correct iron deficiency yellowing in peanuts. *Phosphate fertilizer and compound fertilizers*, (4), 46–48.
- Loeppert, R. H., & Suarez, D. L. (1996). Carbonate and gypsum. *Methods of soil analysis: Part 3 chemical methods*, 5, 437-474.
- Lucena, J. J., Barak, P., & Hernandez-Apaolaza, L. (1996). Isocratic ion-pair high-performance liquid chromatographic method for the determination of various iron (III) chelates. *Journal of Chromatography*, 727(2), 253-264.
- Marschner, P. (2011). Marschner's mineral nutrition of higher plants. *Elsevier, London, UK*, pp. 889.
- Miroshnychenko, O., Xueju, X., & Jason Jiang, C. K. (2008). Methods for producing pure amino acid chelate



- complexes, and uses thereof. U.S. Patent No. 7,341,708.
- Mohammad, K. S., Moin, N., & Maryam, A. (2018). Effect of fe-glycine aminochelate on pod quality and iron concentrations of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under lime soil conditions. *Commun. Soil Science. Plant Analysis*, 49 (2), 215–224.
- Murphy, J., & Riley, J. (1952). A modified single solution method for determination of phosphate uptake by rye. *Soil Science Society of America Journal*, 48, 31-36.
- Navarro-Morillo, I., Navarro-Perez, V., Perez-Millan, R., Navarro-Leon, E., Blasco, B., Camara-Zapata, J. M., & Garcia-Sanchez, F. (2023). Effects of root and foliar application of corn steep liquor on pepper plants: a physiological, nutritional, and morphological study. *Horticulturae*, 9(2), 221.
- Nelson, D. W. & Sommers, L. E. (1996). Total carbon, organic carbon and organic matter. In: D. L. Sparks et al., (Eds.). *Methods of Soil Analysis. Part III. 3rd Ed. Soil Science Society of America Inc. American Society of Agronomy Madison. WI. PP. 61-1010.*
- Ning, X., Lin, M., Huang, G., Mao, J., Gao, Z., & Wang, X. (2023). Research progress on iron absorption, transport, and molecular regulation strategy in plants. *Frontiers in plant science*, 14, 1190768.
- Obayori, O. S., Salam, L. B., Anifowoshe, W. T., Odunewu, Z. M., Amosu, O. E., & Ofulue, B. E. (2015). Enhanced degradation of petroleum hydrocarbons in corn-steep-liquor-treated soil microcosm. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 24(7), 731-743.
- Olsen, S. R. (1954). Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate (No. 939). US Department of Agriculture.
- Pandey, S., Bajpai, P., Tiwari, M., & Singh, S. (2023). Effect of Abiotic Stresses on Growth and Metabolism of The Plant and Stress Tolerance Mechanism. *International Journal for Science and Advance Research in Technology*, (9) 3: 305-311.
- Rastogi, M., Verma, S., Kumar, S., Bharti, S., Kumar, G., Azam, K., & Singh, V. (2023). Soil health and sustainability in the age of organic amendments: A review. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(10), 2088-2102.
- Rhoades, J. D. (1996). Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods*, 5, 417-435.
- Roussos, P. A., Gasparatos, D., Kechrologou, K., Katsenos, P., & Bouchagier, P. (2017). Impact of organic fertilization on soil properties, plant physiology and yield in two newly planted olive (*Olea europaea* L.) cultivars under Mediterranean conditions. *Scientia horticulturae*, 220, 11-19.
- Sahni, S., Sarma, B. K., Singh, D. P., Singh, H. B., & Singh, K. P. (2008). Vermicompost enhances performance of plant growth-promoting rhizobacteria in *Cicer arietinum* rhizosphere against *Sclerotium rolfsii*. *Crop Protection*, 27(3-5), 369-376.
- Schenkeveld, W. D. C., Dijcker, R., Reichwein, A. M., Temminghoff, E. J. M., & Van Riemsdijk, W. H. (2008). The effectiveness of soil-applied FeEDDHA treatments in preventing iron chlorosis in soybean as a function of the o, o-FeEDDHA content. *Plant and Soil*, 303(1), 161-176.
- Schmidt, W., Thomine, S., & Buckhout, T. J. (2019) Editorial: Iron nutrition and interactions in plants. *Front. Plant Science*. 10, 1670.
- Schulte, E., & Kelling, A. (2004). Understanding plant nutrients: Soil and applied copper. A2527. *University of Wisconsin-Extension*.
- Setia, R. K., & Sharma, K. N. (2004). Effect of continuous cropping and long-term differential fertilization on profile stratification of DTPA-extractable micronutrients. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 2, 260–265.
- Sobucki, L., Ramos, R. F., Gubiani, E., Brunetto, G., Kaiser, D. R., & Daroit, D. J. (2019). Feather hydrolysate as a promising nitrogen-rich fertilizer for greenhouse lettuce cultivation. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 8(Suppl 1), 493-499.
- Souri, M. K. & Aslani, M. (2018). Beneficial effects of foliar application of organic chelate fertilizers on French bean production under field conditions in a calcareous soil. *Adv. Hort. Science*, 32(2): 265-272.
- Stewart, Z. P., Paparozzi, E. T., Wortmann, C. S., Jha, P. K., & Shapiro, C. A. (2021). Effect of foliar micronutrients (B, Mn, Fe, Zn) on maize grain yield, micronutrient recovery, uptake, and partitioning. *Plants*, 10(3), 528.
- Sumner, M. E., Farina, M. P. W. (1986). Phosphorus Interactions with Other Nutrients and Lime in Field Cropping Systems. *Adv. Soil Science*, 5, 201–236.
- Thomas, G. W. (1996). Soil pH and Soil Acidity. In: D. L. Sparks et al. (Eds). *Methods of Soil Analysis. Part3. 3rd Ed. Am. Soc. Agron. Madison. WI. PP. 475-490.*
- Widowati, W., Utomo, W. H., Guritno, B., & Soehono, L. A. (2012). The effect of biochar on the growth and

- N fertilizer requirement of maize (*Zea mays* L.) in green house experiment. *Journal of Agricultural Science*, 4(5), 255-262.
- Yu, Z., Guo, B., Sun, T., Li, R., Zhao, Z., & Yao, L. (2025). Effects of organic fertilizer substitution for mineral fertilizer on soil fertility, yield, and quality of muskmelons. *Agronomy*, 15(3), 639.
- Zhang, X., Zhang, P., Hu, Y., Liu, Y., Feng, S., Guo, D., & Dang, X. (2021). Immobilization of cadmium in soil and improved iron concentration and grain yields of maize (*Zea mays* L.) by chelated iron amendments. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(38), 53161-53170.
- Zuluaga, M. Y. A., Cardarelli, M., Roupael, Y., Cesco, S., Pii, Y., & Colla, G. (2023). Iron nutrition in agriculture: From synthetic chelates to biochelates. *Scientia Horticulturae*, 312, 111833.
- Zuo, Y., & Zhang, F. (2011). Soil and crop management strategies to prevent iron deficiency in crops. *Plant Soil*, 339, 83-95.