



Assessing the horizontal and vertical distribution of phosphorus in agricultural soil around maize root using a fertigation method in surface drip irrigation

Meisam Rezaei¹, Somaye Dehghani², Kambiz Bazargan³, Karim Shahbazi⁴

1- Corresponding Author, Soil and Water Research Institute (SWRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran; E-mail: Meisam.rezaei1@gmail.com

2- Salinity Research Department, Bushehr Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Bushehr, Iran. Email: somayehdehghany@yahoo.com

3- Soil and Water Research Institute (SWRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran; E-mail: bazargan_k@yahoo.com

4- Soil and Water Research Institute (SWRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran; E-mail: shahbazikarim@yahoo.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Nov. 10, 2024

Revised: Dec. 6, 2024

Accepted: Jan. 1, 2025

Published online: May. 2025

Keywords:

Soluble Phosphorus,
Available Phosphorus,
Maize,
Fertigation
Drip Irrigation.

ABSTRACT

The availability and efficient utilization of phosphorus, an essential nutrient in agricultural production, through fertigation systems requires precise determination of application rates and an understanding of phosphorus movement and distribution in the soil layers surrounding crops. This study aimed to evaluate the distribution of soluble phosphorus (SSP) and available phosphorus (SAP) in agricultural soil under maize cultivation and in bare soil during two fertigation cycles over various time periods at the Soil and Water Research Institute (Karaj). After tillage, maize was planted using a strip and single-row method, with row and plant spacings of 60 cm and 15 cm, respectively. Following fertigation in both cycles, using micro auger soil samples were collected from both bare soil and soil under maize at horizontal distances of 5 and 10 cm from the dripper and at depths of 0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-30, and 30-40 cm at time intervals of 4, 24, 98, and 960 hours, with two plant replications (two sides of each plants). The samples were subsequently transferred to the laboratory for chemical analysis using conventional measurement methods. The results indicated that fertigation, depth, and time significantly affected the distribution of SSP and SAP in both systematic and non-systematic manners. The analysis of variance revealed that the effect of the fertigation cycle treatment on SSP and SAP under maize cultivation at 5 and 10 cm from the fertilizer injection site was significant (at the 1% statistical level), demonstrating a phosphorus movement of approximately 10 cm within this system. As the depth increased, the average SSP and SAP values exhibited a decreasing trend. The maximum average concentration across all treatments was observed 98 hours after fertilizer injection, indicating an optimal time range for easily accessible phosphorus availability. Overall, due to the unique properties of phosphorus in soil—such as low solubility, low mobility, and high stabilization/fixation by the soil matrix—along with its availability for plants, it is preferable to apply phosphorus fertilizers in a soluble form, approximately 5 centimeters away from the crop, and in more frequent applications.

Cite this article: Rezaei, M., Dehghani, S., Bazargan, K., & Shahbazi, K. (2025). Assessing the horizontal and vertical distribution of phosphorus in agricultural soil around maize roots using a fertigation method in surface drip irrigation. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (3), 571-588. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.385191.669832>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.385191.669832>



EXTENDED ABSTRACT

Background and aim

The agricultural sector faces numerous challenges concerning the utilization of water and mineral resources for crop production and food security. Classic methods of phosphorus fertilization have demonstrated limitations in phosphorus absorption and efficiency of use. The emergence of new technologies, particularly drip fertigation, has facilitated greater solubility and efficiency in phosphorus utilization. The amount of water and fertilizer used, as well as their timing in drip irrigation systems, are critical issues that require optimization. Recently, phosphorus drip fertilization has been proposed as an efficient agricultural practice to enhance phosphorus use efficiency by crops, as it delivers nutrients at the right time and place for plant uptake. This research examines the movement of phosphorus in the soil while gaining a proper understanding of the conditions of drip fertigation, including timing and soil depth, with the aim of achieving increased productivity per unit area to meet nutritional needs and optimize irrigation and fertilization techniques effectively.

Methodology

The present study aimed to assess the distribution of soluble phosphorus (SSP) and available phosphorus (SAP) in agricultural soil under maize cultivation and in bare soil, during two fertigation cycles over different time periods, at the Soil and Water Research Institute (Karaj). Following land preparation, maize was planted in strip and single-row arrangements, with row and plant spacing sets at 60 cm and 15 cm, respectively. After injecting the fertigation solution during the both cycles, soil samples were collected from both bare soil and soil under maize at horizontal distances of 5 and 10 cm from the plant, and at various depths of 0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-30, and 30-40 cm. Sampling was conducted at time intervals of 4, 24, 98, and 960 hours, with two plant replications (two plants each) for laboratory analysis. The samples were then transported to the laboratory for chemical analysis using conventional measurement methods.

Findings

The results of the simple effect of fertigation on the traits indicated that the average SSP and SAP during the second fertigation cycle were significantly higher than those in the first cycle. Conversely, the average SSP and SAP values in bare soil conditions were found to be higher compared to those under maize cultivation. Overall, from the 0 to 5 cm depth, the average values of SSP and SAP decreased as the depth increased. However, no significant differences were observed between the depths of 10, 20, and 30 cm (with vertical movement around 10 cm). The influence of time on phosphorus concentration shows that with the passage of time, an increasing trend began 4 hours after the fertigation injection, with the maximum average observed in all treatments at 98h after fertigation, after which it reached the minimum average at 960 hours. Based on the interaction effects of fertigation and depth (F*D), the highest SSP values in bare soil and under maize cultivation were recorded at L5 and L10, corresponding to F2D1, while the lowest values were associated with F1D6. Soluble and available phosphorus in bare soil was measured with a higher average compared to the soil under maize cultivation. Additionally, according to the results of the mean comparisons, phosphorus values decreased with increasing depth during both fertigation cycles, reaching a minimum at deeper layers. Given that the simple effect of time indicates that initially, after the fertigation injection, phosphorus concentrations gradually increased due to interactions and distribution in the soil during the early hours, and peaked at 98 hours, subsequent factors such as leaching, plant uptake, soil interactions, and transformation of phosphorus forms into non-available forms contributed to the observed reduction.

Conclusion

In this research, a general overview of the availability, movement of phosphorus in drip fertigation, and its distribution at various depths and times has been reported. We believe that the fundamental topics and practical recommendations regarding the management of phosphorus drip fertigation presented in this research paper, including the distribution of fertilization in more frequent intervals and considering the maximum movement of phosphorus up to a limit of 10 cm vertically, horizontally, and laterally, will be of interest to researchers in the agricultural field, farmers, and industries for improving the efficiency of water and phosphorus fertilizer application under drip fertigation regimes.

Author Contributions

The study was conceptualized by Meisam Rezaei, Kambiz Bazargan and Karim Shahbazi who also provided oversight for project administration and funding acquisition. The methodology was developed by Meisam Rezaei, while the software utilized for data analysis was also implemented by Meisam Rezaei and

Somayeh Dehghani. Validation of the findings involved all authors ensuring the robustness of the results. The formal analysis and investigation were conducted by Meisam Rezaei, who also managed the resources and data curation essential for the research. The original draft of the manuscript was prepared by Meisam Rezaei and Somayeh Dehghani, followed by comprehensive writing—review and editing conducted by all authors. Visualization of the data was performed by Somayeh Dehghani. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

The data that support the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Acknowledgements

This work was part of the project titled "Assessing and Modeling the Distribution and Dynamics of Phosphorus and Potassium in Maize and Potato Cultivated Under Drip Irrigation," funded by the Iranian National Elites Foundation and the Soil and Water Research Institute of Iran (SWRI). The authors express their gratitude to all study participants for their contributions and to the SWRI laboratory staff for their invaluable technical support.

Ethical considerations

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

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

ارزیابی توزیع افقی و عمودی فسفر در خاک زراعی اطراف ریشه گیاه ذرت به شیوه کودآبیاری در سیستم قطره‌ای تیپ

میثم رضائی^{۱*}، سمیه دهقانی^۲، کامبیز بازرگان^۳، کریم شهبازی^۴

۱. نویسنده مسئول، موسسه تحقیقات خاک و آب کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. Meisam.rezaei1@gmail.com

۲. بخش تحقیقات شوری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان بوشهر. سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، بوشهر، ایران. somayehdehghany@yahoo.com

۳. موسسه تحقیقات خاک و آب کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. bazargan_k@yahoo.com

۴. موسسه تحقیقات خاک و آب کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. shahbazikarim@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	فراهمی و استفاده کارآمدتر از فسفر به عنوان یکی از عناصر پرمصرف خاک در تولیدات زراعی، با استفاده از سیستم کودآبیاری مستلزم تعیین دقیق مقدار کاربرد و درک حرکت و توزیع فسفر در خاک اطراف گیاه می‌باشد. پژوهش حاضر به منظور دستیابی به اهداف ارزیابی توزیع فسفر محلول (SSP) و قابل استفاده (SAP) در خاک زراعی (آهکی) تحت کشت گیاه ذرت و خاک بدون گیاه، در دو دوره کودآبیاری در طول زمان‌های مختلف، در مزرعه موسسه تحقیقات خاک و آب (کرج) انجام شد. پس از آماده‌سازی زمین، کشت ذرت به صورت نواری و تک ردیفه با فواصل ردیف‌ها و گیاهان از یکدیگر به ترتیب ۶۰ و ۱۵ سانتی‌متر انجام شد. پس از تزریق کودآبیاری کود فسفردر هر دو دوره، نمونه‌برداری از خاک بدون گیاه ذرت و خاک تحت کشت ذرت در فواصل ۵ و ۱۰ سانتی‌متر از محل تزریق به طور افقی و در هر فاصله از عمق‌های ۵-، ۱۰-، ۱۵-، ۲۰-، ۳۰-، ۴۰- و ۳۰- سانتی‌متر با اوگر در در فواصل زمانی ۴، ۲۴، ۹۸ و ۹۶۰ ساعت با دو تکرار گیاه (دو بوته گیاه) انجام شد. سپس نمونه‌ها به منظور تجزیه شیمیایی به آزمایشگاه منتقل و برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های خاک (سه تکرار آزمایشگاهی) با روش‌های معمول اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد: کودآبیاری، عمق و زمان بر توزیع SSP و SAP به طور منظم و نامنظم تأثیرگذار می‌باشد. نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر ساده تیمار دوره کودآبیاری بر SSP و SAP تحت کشت ذرت در فاصله ۵ و ۱۰ سانتی‌متر از محل تزریق کود، تأثیر معنی‌داری (در سطوح آماری یک درصد) داشت که حاکی از حرکت حدود ۱۰ سانتی‌متری فسفر در این سیستم بود. با افزایش عمق، مقادیر میانگین SSP و SAP روند کاهشی را نشان داد. حداکثر میانگین غلظت در همه تیمارها در زمان ۹۸ ساعت پس از تزریق کود مشاهده شد که نشان دهنده محدوده زمانی مناسب در فراهمی آسان فسفر می‌باشد. به طور کلی به دلیل خواص منحصر به فرد فسفر در خاک مانند حلالیت کم، تحرک کم و تثبیت زیاد توسط ماتریکس خاک و در دسترس بودن فسفر برای گیاهان، بهتر است کودهای فسفردر به صورت محلول و در فاصله حدود ۵ سانتی‌متر گیاه زراعی و در تقسیط‌های بیشتری تزریق شود.
واژه‌های کلیدی: فسفر محلول، فسفر قابل استفاده، گیاه ذرت، کودآبیاری و آبیاری قطره‌ای.	

استناد: رضائی، میثم؛ دهقانی، سمیه؛ بازرگان، کامبیز؛ و شهبازی، کریم (۱۴۰۴). ارزیابی توزیع افقی و عمودی فسفر در خاک زراعی اطراف گیاه ذرت به شیوه کودآبیاری در سیستم قطره‌ای تیپ، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶ (۳)، ۵۷۱-۵۸۸. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.385191.669832>



© نویسندگان

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.385191.669832>

مقدمه

انتخاب شیوه مناسب آبیاری و کوددهی از اقدامات فنی موثر و مهم در مدیریت منابع آب و کود و افزایش عملکرد گیاه است. گیاه ذرت یک محصول غذایی استراتژیک در جهان (Chen et al., 2022; Qu et al., 2024 and Gao et al., 2023) و یکی از منابع اصلی خوراک دام، مواد خام صنعتی و انرژی است که از لحاظ مقدار تولید در رتبه اول و از نظر سطح زیر کشت، پس از گندم در رتبه دوم قرار گرفته است (Cui et al., 2018). لذا نه تنها کمیت بلکه کیفیت مطلوب دانه و علوفه آن نیز از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است. باتوجه به اینکه تغذیه بهینه گیاه، شرط اصلی بهبود کمی و کیفی محصول است؛ مصرف مطلوب نهاده‌های مناسب با شرایط رشد گیاه، دستیابی به عملکرد بالای ذرت را ممکن می‌سازد (غیبی و همکاران، ۱۳۹۳). بیشترین سهم کشت ذرت دانه‌ای و علوفه‌ای در ایران به اراضی آبی اختصاص دارد، اما راندمان مصرف آب آبیاری در ایران در مقایسه با کشورهای توسعه یافته بسیار کم است. در برخی موارد کمبود آب منجر به کاهش ۲۵ تا ۳۰ درصدی عملکرد ذرت شده است (Campos et al., 2004). بنابراین، نیاز فوری به انتخاب روش‌های مناسب آبیاری برای بهبود عملکرد محصول ذرت و بهره‌وری آب و تضمین تولید کشاورزی در مناطق دارای محدودیت در تامین آب مانند ایران وجود دارد.

آبیاری قطره‌ای یکی از محبوب‌ترین و مؤثرترین روش‌های آبیاری کم مصرف در جهان است (Tao et al., 2018 and Qu et al., 2024). آبیاری قطره‌ای در رساندن مستقیم آب به ریشه‌های گیاه، صرفه‌جویی در مصرف آب و حصول اطمینان از عملکرد بهینه و کیفیت برتر محصول بسیار کارآمد است. علاوه بر این، کوددهی دقیق را با تحویل کودها به طور مستقیم به منطقه فعال ریشه تسهیل می‌کند و در نتیجه نیازهای گیاه را با دقت برآورده می‌کند (Badr et al., 2010 and Li et al., 2018).

در دهه‌های اخیر، کودآبیاری به عنوان یک فناوری جدید برای اطمینان از استفاده پایدار از آب و منابع معدنی ظهور کرده است (Guo et al., 2023). این رویکرد به عنوان یک فناوری کشاورزی پیشرفته برای تامین مواد مغذی محصولات از طریق سیستم آبیاری قطره‌ای تعریف شده است (Chtouki et al., 2024). این فناوری آب و مواد مغذی را به طور یکنواخت، مناسب و با دقت به منطقه ریشه گیاهان می‌رساند (Li et al., 2021). علاوه بر آن، بررسی عملکرد محصول را تسهیل و هماهنگی مدیریت آب و کود برای دستیابی به صرفه‌جویی در مصرف آب و تولید پایدار گیاه ذرت را فراهم می‌کند. چنانچه ذرت در مراحل اولیه رشد از نظر جذب عناصر غذایی دچار محدودیت شده باشد به دلیل انتقال در خاک و جذب کم عناصر توسط گیاه، عملکرد دانه و علوفه تحت تاثیر قرار می‌گیرد. فسفر یکی از عناصر پرمصرف است که گیاهان به مقدار کافی برای اطمینان از عملکرد رشد و تولید مثل به آن نیاز دارند (Shirazi and Boersma., 1984). اما به دلیل رسوب فسفر در محلول خاک و تثبیت یا جذب سطحی فسفر محلول توسط ذرات خاک، تحرک این عنصر در خاک محدود شده و سبب ناتوانی ریشه در جذب فسفر می‌شود؛ در نتیجه پیامد آن کاهش کارایی کودهای شیمیایی حاوی این عنصر و در نهایت سبب محدودیت دسترسی گیاه به آن خواهد بود (کشاورز و مشیری، ۱۴۰۲). حرکت، انتقال و توزیع فسفر در خاک به عنوان یکی از عناصر پرمصرف، با استفاده از سیستم کودآبیاری در تولید محصول در خاک‌های آهکی مناطق خشک و نیمه خشک و در تعیین زمان صحیح و مدیریت بهینه مصرف کود نقش مهمی دارد (رفیعی و همکاران، ۱۴۰۱).

کوددهی قطره‌ای فسفر شامل استفاده از میزان فسفر کم و مکرر در طول فصل رشد است که زمان قرار گرفتن در معرض کود فسفر را با مواد معدنی خاک محدود می‌کند و دسترسی فسفر را در خاک و جذب آن توسط ریشه گیاه را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، کوددهی قطره‌ای فسفر می‌تواند به راحتی نرخ‌های کاربرد فسفر را مطابق با نیازهای غذایی گیاه در طول فصل رشد برآورده سازد (Chtouki et al., 2024).

به طور کلی برای دستیابی به تعادل بین منابع آب و تولید غذا، تغییر روش‌های آبیاری و کود دهی به مسیری مهم برای رفع تضاد بین آنها تبدیل شده است. درک بهتر پاسخ‌های توزیع مواد مغذی خاک به ویژه فسفر محلول و قابل استفاده، به راهکارهای مختلف کوددهی ناشی از ویژگی‌های تثبیت متفاوت پس از کوددهی با حضور گیاهان مختلف، منجر به طراحی فناوری‌های جدید کوددهی قطره‌ای خواهد شد که ما را به سمت صرفه‌جویی در منابع سوق می‌دهد. از یکسو اهمیت فراهمی و تثبیت فسفر در خاک‌های آهکی و بهینه‌سازی روش‌های آبیاری و کوددهی و از سوی دیگر عدم اطلاعات کافی در خصوص توزیع عنصر فسفر در لایه‌های افقی و عمودی خاک تحت کشت و بدون کشت، لزوم انجام پژوهش حاضر را به اثبات می‌رساند. لذا این پژوهش با هدف بررسی توزیع افقی و عمودی فسفر در خاک زراعی گیاه ذرت در مقایسه با خاک بدون گیاه ذرت، به شیوه کودآبیاری با سیستم قطره‌ای سطحی تیپ انجام شد.

پیشینه پژوهش

کاربرد کودهای شیمیایی علاوه بر مسائل اقتصادی، باعث ایجاد مشکلات زیست محیطی مانند انتشار گازهای گلخانه‌ای (Khan et al., 2017 and Zhang et al., 2024)، آلودگی آب و خاک (Gao et al., 2021 and Srivastav et al., 2023) و تخریب خاک (Shi et al., 2023 and van der Putten et al., 2023) شده است و به طور محدودی بر عملکرد محصول و معیشت بهره برداران موثر است. فناوری یکپارچه‌سازی آبیاری و کوددهی یک فناوری کشاورزی کارآمد برای استفاده از آب و کود، در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است (Chtouki et al., 2024). کریمی و همکاران (۱۳۹۴) به بررسی تأثیر سطوح مختلف آبیاری قطره‌ای (تیپ) ۸، ۱۰۰ و ۱۲۰ درصد نیاز آبی گیاه بر عملکرد و اجزاء عملکرد ذرت دانه‌ای پرداختند نتایج آنان نشان داد در صورت محدودیت منابع آبی، سطح ۸۰ درصد و در عدم محدودیت منابع آبی، سطح ۱۲۰ درصد نیاز آبی مناسب تشخیص داده شد و کشت گیاه ذرت یک ردیفه نسبت به دوردیفه عملکرد بهتری را نشان داد.

انتخاب روش کاربرد کود بستگی به تحرک عناصر غذایی در خاک و سیستم‌های زراعی دارد. کودهای فسفره معمولاً فواصل خیلی کوتاهی در خاک حرکت می‌کنند. حرکت فسفر در خاک بیشتر به روش پخشیدگی است و مقدار فسفر انتقال یافته در خاک بستگی به بافت خاک، جرم مخصوص ظاهری/تراکم خاک، مقدار رطوبت و ظرفیت جذب فسفر دارد. نتایج نشان داده است که غلظت فسفر در محل قطره‌چکان‌های سیستم قطره‌ای در کودآبیاری بیشتر بوده و تدریجاً با فاصله از آن کاهش می‌یابد (Klein and Spieler, 2008). موسوی شلمانی و همکاران (۱۳۸۲) با استفاده از سیستم کودآبیاری تحت کشت گوجه فرنگی، نشان دادند ۶۱/۵ درصد کود فسفوری در پروفیل خاک به فواصل افقی ۵۰ و عمق ۶۰ سانتی‌متری توزیع شده است و بیشترین تجمع فسفر در فاصله ۳۴-۱۸ و عمق ۶۰-۴۱ مشاهده شد. اسلامی و همکاران (۱۳۹۷) به بررسی چالش حرکت عمودی عنصر فسفر در خاک پرداختند در آن مطالعه مقایسه میانگین اثر متقابل بین کود اوره فسفات و عمق‌های مختلف نشان داد که بیشترین میزان فسفر در عمق ۵۰-۰ سانتی‌متری در تیمارهای کودی به دست آمد و ایشان گزارش کردند کود اوره فسفات با وجود اینکه ۱۰۰ درصد قابل حل می‌باشد ولی از عمق ۵۰ سانتی‌متری پایین‌تر نرفت و حرکت آن بسیار کم است. تراماگ و همکاران (۲۰۲۳) تأثیر انواع کاربری اراضی بر توزیع عمقی برخی ویژگی‌های خاک در دو منطقه متفاوت (بیلات زوریا و هولاً) در اتیوپی از لحاظ کشاورزی و اقلیمی را بررسی کردند. غلظت فسفر محلول در خاک باغ در منطقه بیلات زوریا به تدریج از بالا به پایین کاهش یافت در حالی که در خاک تحت کشتزارها و جنگل‌ها به طور نامنظم کاهش یافت. در خاک با کشت زراعی بیشترین مقدار فسفر (۱۳۶/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در لایه بالایی خاک ۵-۰ سانتی‌متر مشاهده شد. به طوریکه مقادیر کمتر در عمق‌های ۱۰-۵، ۱۵-۲۰ و ۳۰-۲۵ سانتی‌متر با میانگین ۱۳۶/۶، ۴۶/۵ و ۳۲/۸ و ۳۹/۴ پی‌پی‌ام مشاهده شد. در خاک جنگلی در مکان زوریا در عمق ۱۰-۵ سانتی‌متر، بیشترین میانگین (۴۲/۶) را نشان داد. از سوی دیگر، در مکان هولاً، فسفر در لایه بالایی خاک بیشترین بود و به طور نامنظم در سراسر کاربری‌ها با افزایش عمق، کاهش یافت.

روش‌شناسی پژوهش

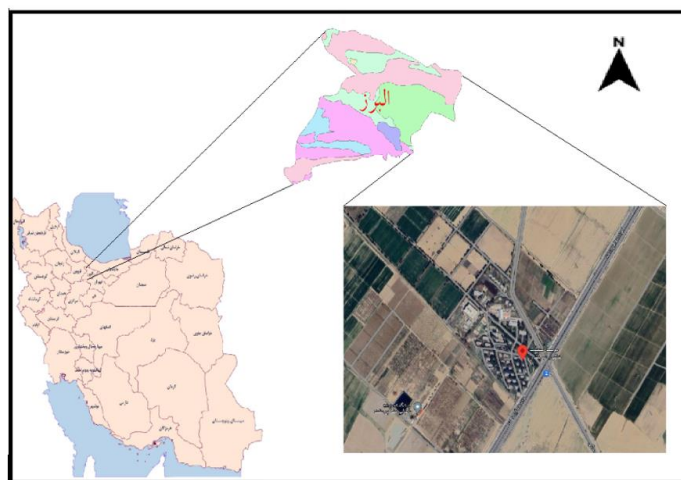
موقعیت منطقه

پژوهش حاضر در مزرعه موسسه تحقیقات خاک و آب کشور (با طول و عرض جغرافیایی 35.758426, 50.956391 متر) در استان البرز، شهر کرج اجرا شد (شکل ۱).

عملیات کاشت، کوددهی و آبیاری

پژوهش حاضر با سیستم تحت کشت خاکورزی سنتی به انضمام سیستم قطره‌ای تیپ در شرایط آب و هوایی نیمه‌خشک در یک فصل زراعی (۱۳۹۷-۱۳۹۸) گیاه ذرت علوفه‌ای (رقم ۷۰۴ سینگل کراس) در منطقه مورد مطالعه انجام گرفت. از آنجایی که پاسخ عملکرد محصول نسبت به عملیات زراعی در مزرعه می‌تواند بسیار متغیر باشد و اغلب تحت تأثیر شرایط محیطی و مدیریتی در طول فصل رشد است لذا به منظور بررسی بهتر و کاهش خطای پژوهش، کشت گیاه ذرت در منطقه با شرایط مشابه مدیریت زراعی کشاورزان انجام شد. پیش از کشت گیاه ذرت، نمونه‌های مرکب از خاک مزرعه برداشت و به منظور انجام آنالیزهای فیزیکی و شیمیایی به آزمایشگاهی منتقل شدند. پس از آماده‌سازی زمین به ابعاد حدود ۲۰ در ۳۰، کشت ذرت بصورت نواری و تک ردیفه به فاصله ۶۰ سانتی‌متر و فاصله هر گیاه از گیاه دیگر به طور میانگین ۱۵ سانتی‌متر در طول ردیف مشخص شد. به منظور توصیه کودی در زمان کاشت، ۴ نمونه خاک، از عمق

صفر تا ۴۰ سانتی‌متر به فواصل ۱۰ سانتی‌متر برداشت شد و میزان غلظت برخی عناصر در نمونه‌های خاک، قرائت شد. به منظور بیشترین عملکرد، بر اساس توصیه کودی برگرفته از دستورالعمل تلفیقی حاصلخیزی و تغذیه گیاه ذرت (غیبی و همکاران، ۱۳۹۳) و تجزیه خاک ترکیب توصیه شده برای ذرت، ۱۵۰ کیلوگرم کود سوپرفسفات تریپل لحاظ شد. از آنجا که این کود انحلال پذیری کمی دارد و مناسب کودآبیاری نیست لذا از محلول کودی از منبع KH_2PO_4 معادل مقادیر فسفر توصیه شده استفاده شد. تاریخ کاشت ۲۹ خرداد ۱۳۹۷ بود و کودآبیاری اول ۳۶ روز پس از کاشت، و کودآبیاری دوم ۶۵ روز پس از کشت انجام شد. کوددهی به صورت قطره‌ای، یک ساعت پس از شروع آبیاری در دو نوبت (دو تقسیط)، به مدت سه ساعت، انجام گرفت. در ابتدا آبیاری بدون کوددهی انجام گرفت تا خاک مرطوب گردد و اثر رطوبت اولیه در حرکت آب و املاح تعدیل گردد. در مرحله دوم کود محلول از مخزن کودی با تزریق دقیقاً زیر قطره چکان انجام شد. استفاده از منبع کود و تزریق به منظور افزایش دقت، کنترل شرایط و فائق آمدن بر محدودیت‌ها انجام شد. حجم کودآبیاری (محلول کودی) در هر تزریق معادل مقدار آب آبیاری در طول سه ساعت بود. برنامه‌ریزی آبیاری (تیپ باقطره‌چکان با فاصله ۲۰ سانتی‌متری) به صورت دومرتبه در هفته و هر مرتبه حدود ۴ ساعت به میزان ۴ لیتر بر ساعت در هر متر، با فشار حدود ۰/۶ بار انجام گرفت. همین فرایند در خاک بدون گیاه با همان فواصل آبیاری و مقادیر کوددهی نیز انجام شد. به‌طور کلی اندازه‌گیری‌ها نشان داد که دبی هر قطره چکان لوله تیپ بین ۷۰۰ الی ۸۰۰ میلی‌لیتر بسته به ابتدا و انتهای نوار تیپ تعیین شد.



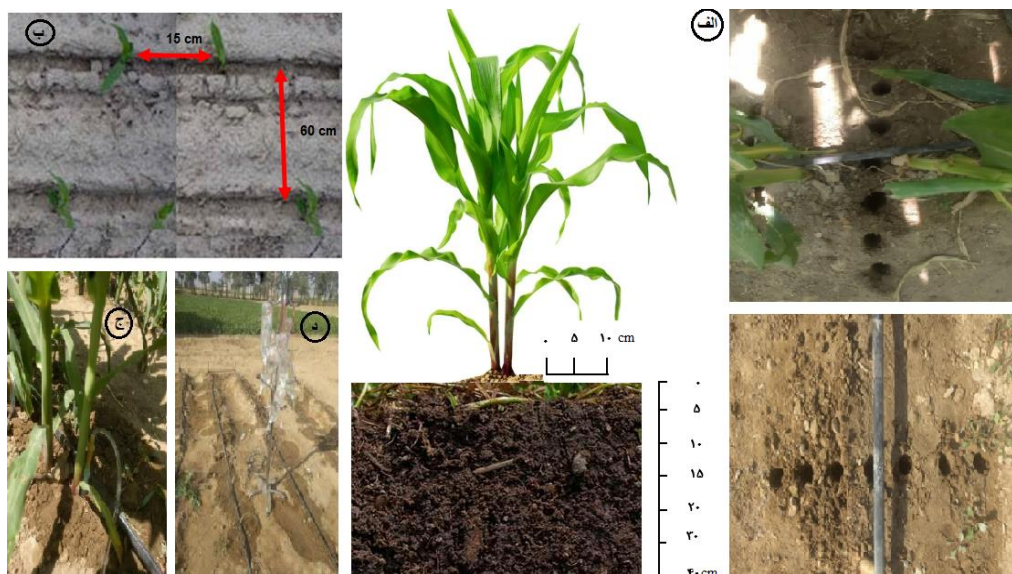
شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

نمونه‌برداری

پس از تزریق کودآبیاری در دو دوره کوددهی، نمونه‌برداری از فواصل افقی ۵ و ۱۰ سانتی‌متر از محل تزریق کودآبیاری (L_5 و L_{10}) و در هر فاصله از عمق‌های ۵ - ۱۰، ۱۵ - ۲۰، ۲۰ - ۳۰، ۳۰ - ۴۰ و ۴۰ - ۳۰ سانتی‌متر (D_5 ، D_{10} ، D_{15} ، D_{20} ، D_{30} و D_{40}) با آگر در فواصل زمانی ۴، ۲۴، ۹۸ و ۹۶۰ (T_4 ، T_{24} ، T_{98} و T_{960}) با دو تکرار (دو بوته گیاه و هر بوته دو تکرار) انجام شد. همچنین نمونه از خاک منطقه بدون گیاه ذرت از اعماق مختلف و در زمان‌های مختلف ذکر شده بالا برداشته شد. در دوره اول و دوم کودآبیاری در هر فاصله از گیاه (۵ و ۱۰ سانتی‌متر) در ۴ زمان مختلف از ۶ عمق متفاوت ۹۶ نمونه خاک با دو تکرار مکانی برداشته شد. به‌طور کلی تیمارهای آزمایش، کودآبیاری، زمان و عمق در دو فاصله ۵ و ۱۰ سانتی‌متر از محل تزریق کودآبیاری تعیین شد.

آنالیز آب و کودآبیاری

به منظور آنالیز آب و کودآبیاری پارامترهای pH، EC، NH_4^+ ، NO_3^- ، Ca^{2+} ، K^+ ، Na^+ ، Cl^- ، Mg^{2+} ، HCO_3^- و CO_3^{2-} با روش‌های معمول اندازه‌گیری شدند. جدول ۱ ترکیب شیمیایی آب مورد استفاده برای آبیاری و غلظت املاح مراحل کودآبیاری را نشان می‌دهد. آب آبیاری بدون کود دارای واکنش (پی‌اچ) ۸/۵ و قابلیت هدایت الکتریکی ۰/۳۴ دسی‌زیمنس بر متر بود. با افزودن املاح کودی pH کاهش و قابلیت هدایت الکتریکی افزایش یافت.



شکل ۲. الف. نمونه برداری از لایه های افقی و عمودی خاک در فواصل مختلف، ب. فاصله ردیف های کشت گیاه ذرت و فواصل گیاهان با یکدیگر، ج. تصاویر از مرحله رشد رویشی گیاه، د. نحوه کودآبیاری و آبیاری قطره ای

جدول ۱. ترکیب شیمیایی و غلظت املاح موجود در آب آبیاری و کودآبیاری.

CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Mg ²⁺	Cl ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	P	ECe	pH
mg/l										ds.m ⁻¹	واحد
۰/۲	۱۰۳/۷	۷/۲	۳۵/۵	۱۳/۷	۰/۸	۴۶	۶/۴۴	۳/۹۲	۰	۰/۳۴	۸/۵
۴۸	۲۵۶	۳	۱۸	۱۸	۵۱۴	۳	۵۰۴	۵۱۶	۰/۰۴	۱	۷/۸
۰	۶۲۸	۹	۲۵	۱۹	۴۲۳	۵	۴۷۹	۵۰۰	۰/۰۳	۱	۷/۸

تجزیه خاک

به منظور انجام آزمایش های فیزیکی و شیمیایی، نمونه های خاک در سایه خشک شدند و پس از کوبیدن از الک ۲ میلیمتر عبور داده شدند. بافت خاک به روش هیدرومتری (Bouyoucos, 1962)، واکنش گل اشباع با استفاده از دستگاه pH متر دارای الکتروود شیشه ای (McLean, 1983)، میزان فسفر قابل جذب با روش اولسن (Olsen, 1965)، میزان فسفر محلول عصاره اشباع به روش رنگ سنجی و درصد رطوبت اشباع نمونه های خاک، پس از برداشت نمونه از محل اشباع شده و سپس خشک کردن گل اشباع در آون در دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد به مدت ۲۴ ساعت و توزین مجدد آن ها از رابطه زیر به دست آمد (Famiglietti et al., 1998)

رابطه ۱) $100 \times ((\text{وزن گل خشک} - \text{وزن گل اشباع})) = \text{درصد رطوبت اشباع}$
 مطابق نتایج آزمون خاک (جدول ۲) با افزایش عمق خاک، میانگین درصد شن کاهش و درصد رس و سیلت افزایش یافت. باتوجه به درصد اندازه ذرات خاک، بافت خاک لوم رسی می باشد. قابلیت هدایت الکتریکی نیز با افزایش عمق افزایش یافت.

جدول ۲. ویژگی های فیزیکی و شیمیایی لایه های خاک

عمق (cm)	شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	ECe (ds.m ⁻¹)	SP (%)	pH	SAP (mg.kg ⁻¹)	SSP (mg.kg ⁻¹)
۱۵-۰	۴۲	۳۰	۲۸	۱/۵۱	۱۲	۷/۹	۱۰/۲	۰/۰۷
۳۵-۱۵	۴۴	۳۲	۲۴	۱/۵۵	۱۲	۷/۰	۹/۶	۱/۱
۶۵-۳۵	۳۰	۴۰	۳۰	۲/۶۶	۱۰	۷/۹	۸/۴	۰/۸

EC, Clay, Silt, Sand^{*} به ترتیب درصد شن، سیلت و رس، قابلیت هدایت الکتریکی، درصد رطوبت اشباع، اسیدیته، فسفر قابل استفاده و فسفر محلول می باشد.

تجزیه و تحلیل آماری داده ها

تجزیه و تحلیل داده ها با استفاده از نرم افزار آماری SAS 9.0 و به صورت فاکتوریل (کودآبیاری، زمان و عمق) در قالب طرح کامل تصادفی انجام شد. در ترسیم نمودارها از نرم افزار Excel بهره گرفته شد. مقایسه میانگین داده ها توسط آزمون LSD در سطح احتمال ۰/۰۵ و ۰/۰۱ انجام شد.

یافته‌های پژوهشی

خلاصه‌ای از پارامترهای آماری غلظت فسفر محلول (SSP) و قابل استفاده (SAP) در خاک بدون گیاه و خاک تحت کشت گیاه ذرت (محدوده، کمترین، بیشترین، میانگین و ضریب تغییرات) در جدول (۳) گزارش شده است. به طور کلی در بین متغیرهای مورد مطالعه کمترین ضریب تغییرات^۱ (CV) مربوط به SSP در دور اول کودآبیاری در فاصله ۱۰ سانتی‌متری (L₁₀) گیاه ذرت است و بیشترین آن مربوط به SAP در دور دوم کودآبیاری در فاصله ۵ سانتی‌متری (L₅) از گیاه است. درحالیکه کمترین و بیشترین ضریب تغییرات غلظت فسفر در خاک بدون گیاه به ترتیب مربوط به کودآبیاری اول در فاصله ۵ سانتی‌متری و کودآبیاری دوم در فاصله ۱۰ سانتی‌متری می‌باشد. به طور کلی در حضور گیاه ذرت تغییرات CV (۲۲ تا ۸۶) نسبت به خاک بدون گیاه (۵۳ تا ۷۶) اختلاف بیشتری را نشان می‌دهد. به دلیل اینکه داده‌های آماری در اعماق مختلف و زمان‌های مختلف نمونه‌برداری شده است ضریب تغییرات بالایی را نشان می‌دهند.

جدول ۳. خلاصه آماری غلظت فسفر محلول و قابل استفاده خاک بدون گیاه و خاک تحت کشت ذرت در دو دوره کودآبیاری در عمق (صفر تا ۴۰ سانتی‌متر)

ویژگی‌ها	خاک بدون گیاه				خاک تحت کشت ذرت			
	فاصله افقی ۵ سانتی‌متر		فاصله افقی ۱۰ سانتی‌متر		فاصله افقی ۵ سانتی‌متر		فاصله افقی ۱۰ سانتی‌متر	
	کودآبیاری ۱	کودآبیاری ۲	کودآبیاری ۱	کودآبیاری ۲	کودآبیاری ۱	کودآبیاری ۲	کودآبیاری ۱	کودآبیاری ۲
	SSP	SAP	SSP	SAP	SSP	SAP	SSP	SAP
محدوده	۱۴/۹	۴۴	۳۲/۴	۳۱/۶	۱۶	۵۱/۱	۴/۴	۱۵/۱
حداقل	۲/۲	۵/۴۳	۳/۶	۲/۱۵	۱/۶	۳	۴/۱	۴/۲
حداکثر	۱۷/۱	۴۹/۵	۳۶/۱	۳۳/۷	۱۷/۶	۵۴/۱	۸/۶	۱۹/۴
میانگین	۵/۶	۱۳/۹	۸/۲	۱۰/۲	۴/۵	۱۲/۴	۵/۳	۷/۷
ضریب تغییرات (درصد)	۵۳	۷۲	۷۴	۷۶	۷۵	۸۶	۲۲	۴۳

تجزیه واریانس

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر ساده تیمار دوره کودآبیاری بر SSP و SAP تحت کشت ذرت در L₁₀ و L₅، تأثیر معنی‌داری (در سطوح آماری یک درصد) را نشان داد (جدول ۴).

جدول ۴. تجزیه واریانس میانگین مربعات فسفر محلول و فسفر قابل استفاده تحت دو دوره کودآبیاری در اعماق مختلف خاک در زمان‌های متفاوت

منابع تغییرات (Source)		درجه آزادی (df)		میانگین مربعات (Mean Square)			
				فاصله ۵ سانتی‌متری		فاصله ۱۰ سانتی‌متری	
				خاک بدون گیاه	خاک تحت کشت	خاک بدون گیاه	خاک تحت کشت
				SAP	SSP	SAP	SSP
دور کود-آبیاری	۱			۴۹۳/۳۷ ns	۱۲۰/۳۷ **	۴/۲۷ ns	۱۶۳/۶ *
عمق	۵			۳۹۴۱/۱ **	۱۶/۹۳ **	۲۲۷۵/۹۶ **	۱۳۸/۷۵ **
زمان	۳			۶۹/۴ *	۲ ns	۵۴۴/۳۵ ns	۶۵/۴ ns
دور کودآبیاری * عمق	۵			۲۰۰۱/۷ **	۱۸/۹ **	۱۱۷۱/۳۷ **	۹۰/۶ **
دور کودآبیاری * زمان	۳			۱۶۴۲/۱۴ **	۲۰/۷۶ **	۵۰۰/۲۶ ns	۷۵/۹ **
عمق * زمان	۱۵			۱۳۹۰/۴۳ **	۵/۵ **	۸۷۵/۲۶ **	۵۳/۶۴ **
خطای آزمایشی				۱۴/۴	۲/۳	۲۲۲	۱۶

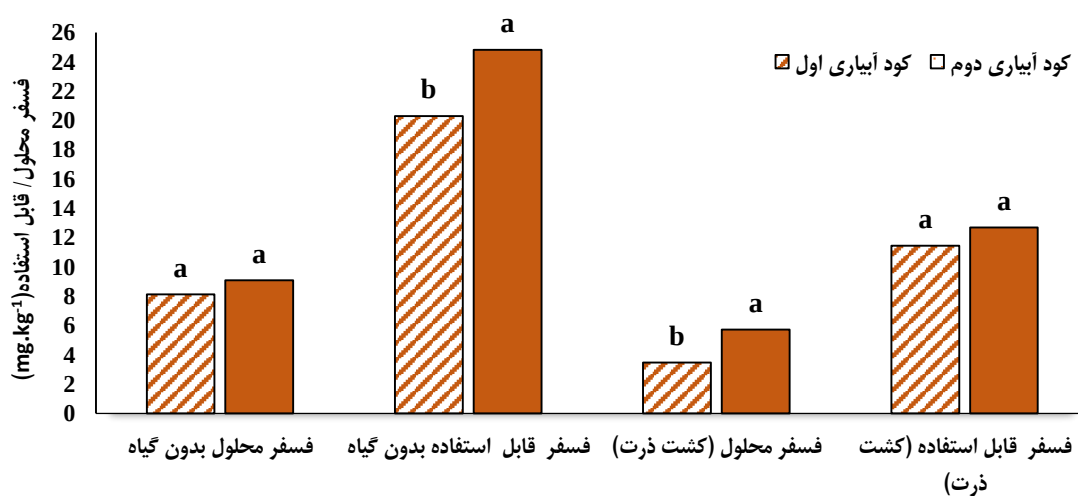
** و * و ns معنی‌دار بودن در سطح احتمال یک درصد و پنج درصد و عدم معنی‌داری را نشان می‌دهند.

اثر ساده کودآبیاری بر روی غلظت فسفر مورد بررسی خاک بدون گیاه در فواصل L₁₀ و L₅ نتایج معنی‌داری را در سطح یک درصد نشان نداد. نتایج اثر ساده عمق خاک بر غلظت فسفر در در فواصل L₁₀ و L₅ در سطح یک درصد معنی‌دار شد. درحالیکه تأثیر زمان

بر SSP و SAP بدون کشت گیاه، فقط در فاصله L_5 تفاوت معنی‌داری را نشان داد. مطابق نتایج اثرات متقابل کودآبیاری و عمق خاک بر غلظت فسفر در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. تاثیر متقابل کودآبیاری و زمان به جز SAP تحت کشت ذرت در L_5 و SSP تحت کشت ذرت در L_{10} ، بر سایر غلظت‌ها معنی‌دار شد.

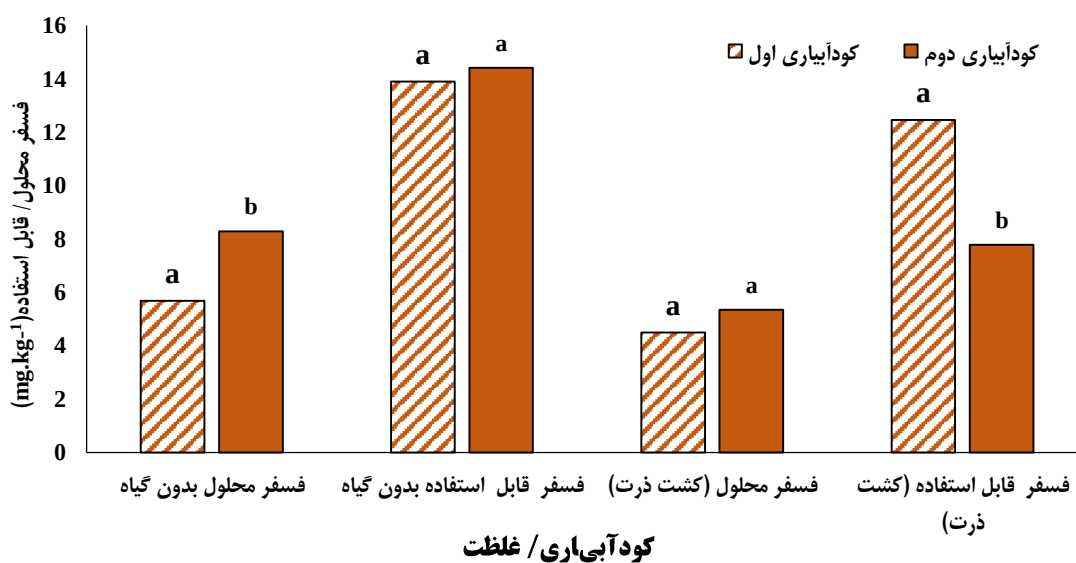
اثر کودآبیاری بر غلظت فسفر در زمان و مکان

براساس نتایج مقایسه میانگین (شکل ۳) اثر ساده کودآبیاری بر غلظت SSP بدون کشت گیاه و SAP تحت کشت ذرت در L_5 تفاوت معنی‌داری را نشان نداد. درحالی‌که در خاک تحت کشت ذرت SSP میانگین بالاتری در F_2 (۵/۷) نسبت به F_1 (۳/۴) در سطح احتمال یک درصد نشان داد. SAP در خاک بدون کشت با میانگین ۱۲/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم در F_2 نسبت به F_1 با میانگین ۱۱/۴۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم روند افزایشی معنی‌داری را نیز نشان داد. همچنین باتوجه به میانگین غلظت‌ها در شکل ۳، SSP و SAP در شرایط بدون گیاه نسبت به کشت ذرت مقادیر بالاتری را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۴، نتایج مقایسه میانگین اثر ساده کودآبیاری بر SSP در خاک بدون گیاه و SAP تحت کشت ذرت در L_{10} تفاوت معنی‌داری را در سطح یک درصد نشان داد.



کودآبیاری / غلظت

شکل ۳. مقایسه میانگین اثر ساده کودآبیاری در فاصله ۵ سانتی‌متری از محل تزریق کود بر غلظت‌های فسفر محلول و قابل استفاده

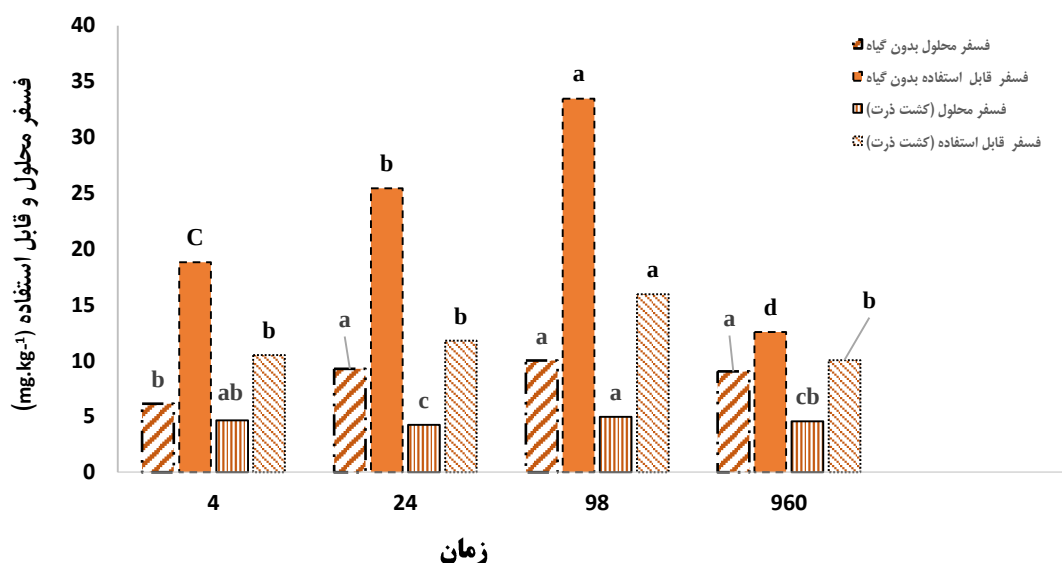


کودآبیاری / غلظت

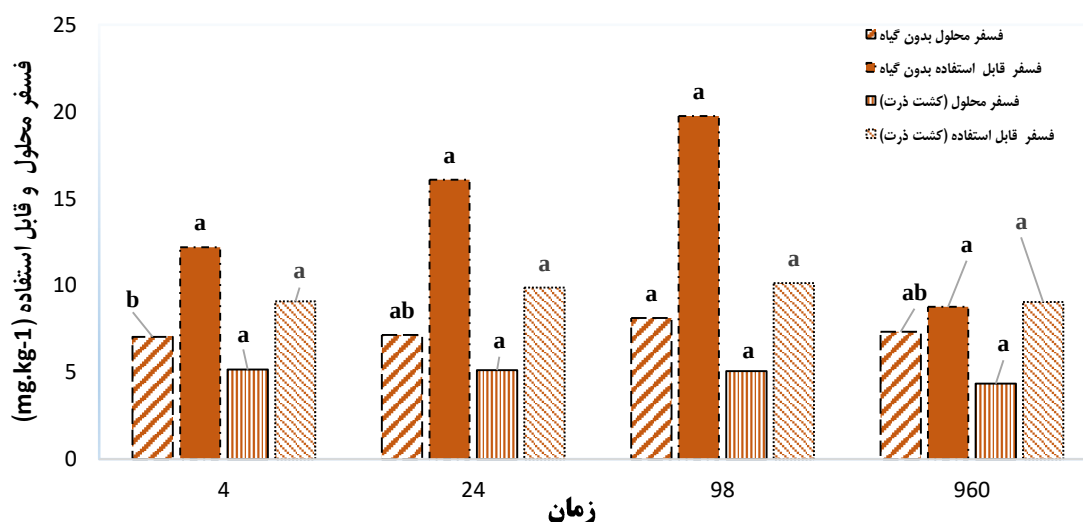
شکل ۴. مقایسه میانگین اثر ساده کودآبیاری در فاصله ۱۰ سانتی‌متری از محل تزریق کود بر غلظت‌های فسفر محلول و قابل استفاده

اثر زمان بر غلظت فسفر

مقایسه میانگین اثر ساده زمان بر SSP و SAP در L₅ نشان داد میانگین غلظت فسفر در زمان‌های اول با سایر زمان‌ها تفاوت معنی‌داری وجود دارد. به طور کلی در فاصله ۵ سانتی‌متر از محل تزریق کود پس از ۴ ساعت، روند افزایشی آغاز شده است. حداکثر میانگین در همه تیمارها در T₉₈ مشاهده شده است و پس از آن در زمان ۹۶۰ ساعت به حداقل میانگین رسیده است. بیشترین مقدار SSP و SAP بدون کشت گیاه در L₅ با میانگین ۱۰ و ۳۳/۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد. بیشترین مقدار SSP و SAP تحت کشت ذرت در L₅ با میانگین ۴/۹ و ۱۵/۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد. با توجه به شکل ۶ به جز SSP بدون کشت در L₁₀ تاثیر زمان بر سایر صفات معنی‌دار نشد.



شکل ۵. مقایسه میانگین اثر ساده دوره زمانی در فاصله ۵ سانتی‌متری از محل تزریق کود بر غلظت‌های فسفر محلول و قابل استفاده

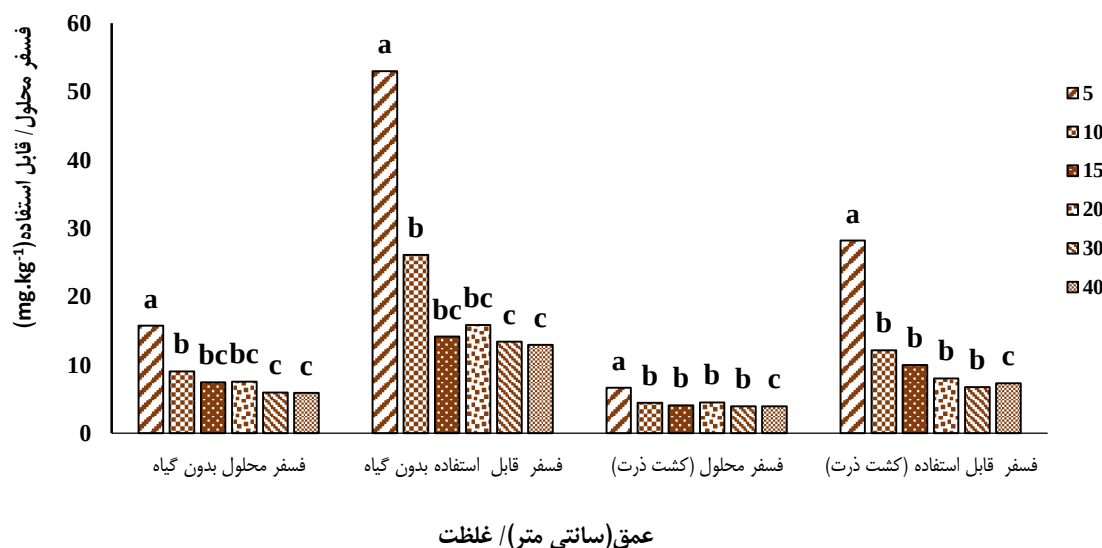


شکل ۶. مقایسه میانگین اثر ساده دوره زمانی در فاصله ۱۰ سانتی‌متری از محل تزریق کود بر غلظت‌های فسفر محلول و قابل استفاده

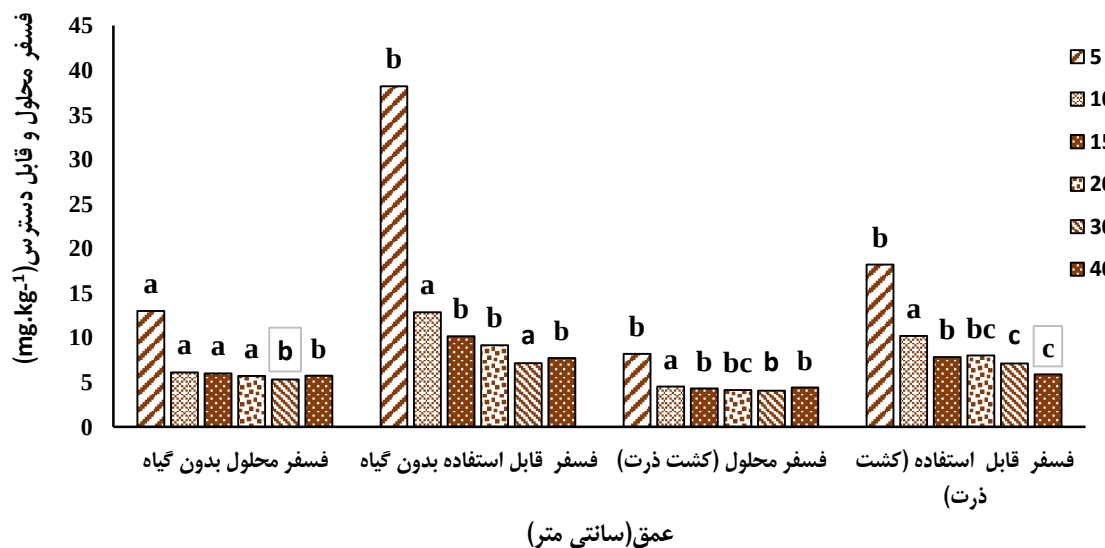
اثر عمق خاک بر غلظت فسفر

نتایج مقایسه میانگین اثر ساده عمق خاک بر غلظت‌های فسفر (شکل ۷) در L₅ نشان داد بیشترین میانگین SSP و SAP بدون کشت و تحت کشت ذرت در عمق سطحی صفر تا ۵ سانتی‌متری (D₅) به ترتیب با میانگین ۱۵/۷۵، ۵۲/۹۹، ۶/۶ و ۲۸/۲۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم و کمترین میانگین صفات مذکور به ترتیب ۵/۹۱، ۱۲/۹۵، ۳/۹۶ و ۷/۲۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم در عمق ۳۰ تا ۴۰ سانتی‌متر می‌باشد. به طور

کلی از عمق صفر تا ۵ سانتی متری به سمت اعماق بیشتر مقادیر میانگین فسفر کاهش یافته است. اما بین اعماق ۱۰، ۲۰ و ۳۰ تفاوت معنی داری مشاهده نشد. با توجه به نمودار ۶ در L_{10} نیز مقادیر میانگین SSP و SAP در تمامی تیمارهای بدون کشت و کشت ذرت با افزایش عمق نسبت به افق سطحی میانگین کمتری از غلظت فسفر را نشان می دهد. بیشترین میانگین SSP و SAP بدون کشت و کشت ذرت به ترتیب ۱۲/۹۷، ۳۸/۱۹، ۸/۱۶ و ۱۸/۲ میلی گرم بر کیلوگرم در D_5 و کمترین میانگین غلظت فسفر به ترتیب ۵/۷۵، ۷/۷۲، ۴/۴۰ و ۵/۸ میلی گرم بر کیلوگرم D_{40} می باشد.



شکل ۷. مقایسه میانگین اثر ساده غلظت های فسفر محلول و قابل استفاده در ۶ عمق مختلف در فاصله ۵ سانتی متری از محل تزریق کود



شکل ۸. مقایسه میانگین اثر ساده غلظت های فسفر محلول و قابل استفاده در ۶ عمق مختلف در فاصله ۱۰ سانتی متری از محل تزریق کود

اثرات متقابل کودآبیاری و زمان

بر اساس اثرات متقابل کود- آبیاری و زمان (FT) بیشترین مقدار SSP بدون کشت و تحت کشت ذرت در L₅ مربوط به F₂T₃ با میانگین ۱۳/۵ و ۶/۵ میلی گرم بر کیلوگرم و کمترین آن مربوط به F₁T₁ و F₁T₄ می باشد. بیشترین مقدار SSP بدون کشت در L₁₀ مربوط به F₂T₁ با میانگین ۱۲ میلی گرم بر کیلوگرم می باشد و در شرایط کشت ذرت میانگین ها معنی دار نشد. SAP در فاصله L₅ در شرایط بدون کشت و تحت کشت در تیمار F₂T₃ با میانگین ۴۸/۱ و ۱۷/۲ میلی گرم بر کیلوگرم می باشد. درحالی که در فاصله L₁₀ در شرایط بدون کشت و تحت کشت ذرت مربوط به F₂T₃ می باشد.

اثرات متقابل کودآبیاری و عمق

بر اساس اثرات متقابل کود- آبیاری و عمق (FD)^۲ بیشترین مقدار SSP بدون کشت و تحت کشت ذرت در L₅ و L₁₀ مربوط به F₂D₁ و کمترین آن مربوط به F₁D₆ می باشد. فسفر محلول و قابل استفاده در خاک بدون کشت با میانگین بیشتر نسبت به شرایط خاک تحت کشت ذرت اندازه گیری شده است. همچنین با توجه به نتایج مقایسه میانگین ها با افزایش عمق در هردو دوره کودآبیاری، مقادیر غلظت فسفر کاهش یافته و در اعماق به حداقل می رسد.

جدول ۵. مقایسه میانگین اثرات متقابل کودآبیاری و عمق و کودآبیاری و زمان بر صفات مورد مطالعه

فاصله افقی ۵ سانتی متری				فاصله افقی ۱۰ سانتی متری			
فسفر محلول در خاک		فسفر قابل استفاده خاک		فسفر محلول خاک		فسفر قابل استفاده خاک	
تیمارها	بدون گیاه	کشت ذرت	بدون گیاه	کشت ذرت	بدون گیاه	کشت ذرت	بدون گیاه
F ₁ T ₁	۶/۲ ^d	۴/۱ ^{cd}	۱۹ ^{bc}	۱۲/۷ ^a	۵/۴ ^{bc}	۵/۴۵ ^a	۱۵/۵ ^{ab}
F ₁ T ₂	۸/۳۲ ^{bcd}	۳/۳ ^d	۳۰/۱ ^b	۹/۶ ^a	۶/۵ ^{bc}	۵/۱۲	۱۹/۴۵ ^{ab}
F ₁ T ₃	۱۲/۴ ^b	۳/۴ ^d	۱۸/۸ ^{bc}	۱۴/۶ ^a	۶/۲ ^c	۴/۸ ^a	۱۲/۳ ^{ab}
F ₁ T ₄	۱۱/۵ ^{ab}	۳ ^d	۱۳/۲ ^c	۸/۸۳ ^a	۷/۶ ^b	۲/۵	۸/۶۵ ^b
F ₂ T ₁	۷ ^c	۵/۱۳ ^c	۱۸/۶ ^{bc}	۸/۳ ^a	۱۲ ^a	۵/۸ ^a	۸/۸ ^b
F ₂ T ₂	۱۰/۲ ^{abc}	۵/۱۶ ^{bc}	۲۰/۷ ^{cb}	۱۳/۹ ^a	۷/۷ ^b	۵/۱ ^a	۱۲/۷ ^{ab}
F ₂ T ₃	۱۳/۵ ^a	۶/۵ ^a	۴۸/۱۳ ^a	۱۷/۲۲ ^a	۶/۲۳ ^{bc}	۵/۲ ^a	۲۷/۲ ^a
F ₂ T ₄	۶/۵ ^{cd}	۶ ^b	۱۱/۸ ^c	۱۱/۲۵ ^a	۷ ^b	۶/۱ ^a	۸/۸ ^b
F ₁ D ₁	۱۶/۲ ^a	۵/۷ ^b	۴۲ ^b	۱۹/۵۷ ^b	۹ ^b	۹/۷ ^a	۳۰ ^b
F ₁ D ₂	۸/۱ ^{bc}	۳/۳ ^c	۲۹/۲ ^{cd}	۱۲ ^{bc}	۴/۹ ^c	۴/۴ ^c	۱۰/۶
F ₁ D ₃	۸ ^{bc}	۳/۲ ^c	۱۴ ^{cd}	۱۳/۷ ^{bc}	۵/۵ ^{bc}	۳/۷۸ ^c	۱۱/۹ ^c
F ₁ D ₄	۶ ^{bc}	۳/۴	۱۵/۴۸ ^{cd}	۸/۵ ^c	۵/۳ ^{bc}	۳/۴ ^{cd}	۱۲/۶ ^c
F ₁ D ₅	۵/۱۸ ^c	۲/۶۹ ^c	۱۰/۹ ^d	۷ ^c	۴/۳ ^c	۲/۸ ^d	۹/۱۹ ^c
F ₁ D ₆	۵/۱۵ ^c	۲/۵ ^c	۱۰/۱ ^d	۷/۷ ^c	۴/۷ ^c	۳/۱ ^{cd}	۹/۴ ^c
F ₂ D ₁	۱۷/۲ ^a	۷/۵۶ ^a	۶۳/۹ ^a	۳۶/۸ ^a	۱۶ ^a	۹/۸ ^a	۴۶/۳ ^a
F ₂ D ₂	۹/۹ ^b	۵/۵۹ ^b	۲۲/۹ ^{cd}	۱۲/۲ ^{bc}	۷/۲ ^{bc}	۵ ^b	۱۵/۱ ^{bc}
F ₂ D ₃	۶/۸۳ ^{bc}	۴/۹۵	۱۶/۲ ^{cd}	۶/۲۸ ^c	۶/۵ ^{bc}	۴/۷ ^{bc}	۸/۳ ^c
F ₂ D ₄	۹ ^{bc}	۵/۵۸ ^b	۱۶/۱ ^{cd}	۷/۴ ^c	۶/۱ ^{bc}	۴/۸ ^{bc}	۵/۶ ^c
F ₂ D ₅	۶/۷۵ ^{bc}	۵/۱ ^b	۱۵/۸ ^{cd}	۶/۴۷ ^c	۶/۱۹ ^{bc}	۵/۲ ^{bc}	۵ ^c
F ₂ D ₆	۶/۶۸ ^{bc}	۵/۴۲ ^b	۱۵/۷ ^{cd}	۶/۸ ^c	۶/۷ ^{bc}	۵/۶ ^b	۵/۹ ^c

حروف مشابه در یک سطر نشانگر عدم وجود تفاوت معنی دار در سطح ۵٪

F₁: کودآبیاری اول، F₂: کودآبیاری دوم، T₁، T₂، T₃ و T₄ زمان های ۴، ۲۴، ۹۸ و ۹۶۰ ساعت و D₁، D₂، D₃، D₄، D₅ و D₆ عمق های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی متری می باشد.

بحث

نتایج جدول ۵ حاکی از آن است در طول دوره کودآبیاری اول، فسفر قابل استفاده خاک تحت کشت و بدون کشت و فسفر محلول خاک بدون کشت در فاصله ۵ و ۱۰ سانتی متری از محل تزریق بیشترین میانگین را در زمان ۹۸ ساعت (F_1T_3) نشان دادند. درحالیکه فسفر محلول خاک تحت کشت ذرت در L_5 و L_{10} در این زمان نسبت به سایر زمانها مقادیر کمتری را به خود اختصاص داد. به طور کلی میانگین SSP و SAP در F_2T_3 یعنی زمان ۹۸ ساعت در دور دوم کودآبیاری بیشترین میانگین را نشان داد. از این نتایج می توان چنین استنباط کرد سیستم آبیاری، ورود آب به سیستم و به عبارتی آبشویی و جذب توسط گیاه، فعل و انفعالات در خاک و تغییر شکل فرمهای فسفر به اشکال غیرقابل جذب، سبب شد تا پس از ۹۸ ساعت روند کاهشی طی شود و فسفر محلول به دلیل حضور گیاه به تدریج جذب شده و در زمان کوتاهی مقادیر کاهشی از خود نشان دهد. معماری ریشه در ابتدای رشد گیاه، مقدار فسفر قابل جذب اولیه خاک و همچنین مقدار کود فسفره کاربردی در روند توزیع فسفر در خاک بسیار مهم می باشد. ریزوسفر، منطقه بحرانی فعل و انفعالات بین گیاهان، ذرات خاک و میکروارگانیسمها است. ریشه های گیاهان می توانند محیط ریزوسفر را از طریق فعالیت های فیزیولوژیکی مختلف خود، به ویژه موسیلاژ، اسیدهای آلی، فسفاتازها و برخی از مواد سیگنال دهنده خاص که محرک های کلیدی فرآیندهای مختلف ریزوسفر هستند، تغییر دهند (Shen et al., 2011). فرآیندهای شیمیایی و بیولوژیکی در ریزوسفر نه تنها تحرک و جذب مواد مغذی خاک و همچنین پویایی میکروبی را تعیین می کند، بلکه کارایی مواد مغذی محصولات را نیز کنترل می کند و بنابراین به شدت بر بهره وری محصول تأثیر می گذارد (Richardson et al., 2009 و Zhang et al., 2010). فسفر در درون گیاه متحرک بوده و به سرعت از بافت های پیرتر به سمت بافت های جوان تر و فعال حرکت می کند. ذخیره کافی فسفر در خاک، گیاه را قادر می سازد تا یک سیستم ریشه ای قوی و سالم در مراحل ابتدای رشد تشکیل دهد. وجود انشعاب زیاد ریشه و توسعه ریشه های ثانویه سبب افزایش سطح تماس بیشتر ریشه با خاک می شود. این سطح ریشه گسترده به گیاه فرصت می دهد تا بتواند مواد غذایی (فسفر) و رطوبت را از حجم بیشتر و عمق زیادتری از خاک به دست آورد. به دلیل حالیت و تحرک کم فسفر در خاک، می تواند به سرعت در ریزوسفر، با جذب ریشه تخلیه شود و در نتیجه یک گرادیان غلظت فسفر در جهت شعاعی دور از سطح ریشه ایجاد می شود. علی رغم اینکه مقدار کل فسفر خاک معمولاً بیشتر از نیاز گیاه است، تحرک کم فسفر خاک می تواند دسترسی آن به گیاهان را محدود کند. فسفر محلول در محلول خاک ریزوسفر باید ۲۰-۵۰ دفعه در روز با تحویل فسفر از خاک حجیم به ریزوسفر جایگزین شود تا تقاضای گیاه برآورده شود (Marschner, 1995). بنابراین، دینامیک فسفر در ریزوسفر عمدتاً توسط رشد و عملکرد ریشه گیاه کنترل می شود و همچنین با خواص فیزیکی و شیمیایی خاک بسیار مرتبط است (Neumann and Romheld, 2002). با توجه به نتایج به دست آمده می توان بیان کرد در ابتدای تزریق کودآبیاری بر اثر فعل و انفعالات و توزیع فسفر در خاک در ساعات اولیه به تدریج مقادیر فسفر افزایش می یابد و پس از ۹۸ ساعت به اوج می رسد و پس از زمان ۹۶۰ ساعت به حداقل می رسد. بطور کلی می توان استنباط نمود که در طول مدت حدود چهار تا پنج روز پس از کودآبیاری، فسفر به سهولت در دسترس گیاه بوده و گیاه با صرف انرژی کمتر آن را جذب می کند. اما پس از این دوره شرایط خاک و غلظت فسفر مانند قبل از کوددهی شده و لذا گیاه به ورود کود پس از آن واکنش نشان خواهد داد.

مطابق نتایج مشاهده شده (جدول ۵) با افزایش عمق میانگین SSP و SAP کاهش یافته است. هرچه بافت خاک سنگین تر و درصد کربنات کلسیم و دمای آن بالاتر باشد، تثبیت فسفات کاربردی بیشتر خواهد بود (Tariq et al., 2011) با توجه به نتایج آنالیز خاک، بافت منطقه، لومی رسی می باشد و این بافت متوسط دارای رس بیشتری می باشد و درصد رس در عمق ۰ تا ۱۵ سانتی متری بیشتر از عمق ۱۵ تا ۳۵ می باشد لذا احتمالاً در لایه بالایی فرآیند تثبیت فسفر سبب شده است تا فسفر از دسترس خارج شود و تا حدودی مانع از خروج فسفر توسط آبشویی به لایه های زیرین شده و مقادیر فسفر با افزایش عمق کاهش یافته است. نتایج این پژوهش با نتایج برخی محققین دیگر نیز همخوانی دارد. (Owenset et al, 2008) به بررسی تغییرات در توزیع عمقی فسفر قابل جذب در پروفایل های خاک پرداختند نتایج حاکی از آن بود که با افزایش عمق مقادیر فسفر روند کاهشی دارد و بیشترین مقادیر در نزدیکی سطح مشاهده شد درحالیکه فسفر کل در تمام اعماق خاک ثابت و تغییرات واضحی مشاهده نشد. بطور کلی، تغییرات مکانی بسیار زیاد این ویژگی ها در خاک یکی از دلایل مهم اختلافات کاهشی و افزایشی غلظت فسفر در زمان و مکان مختلف نمونه برداری می باشد که می تواند بر نتایج تحلیل اثر گذارد. اما به طور کلی تغییرات کاهشی افزایشی را نیز می توان به جریانات ترجیحی نیز نسبت داد. (Cheng et al (2021 نیز به نتایج مشابهی دست یافتند و گزارش کردند اثر کاربری اراضی و عمق خاک به طور قابل توجهی بر محتوای SAP تأثیر می گذارد. تفاوت معنی داری در SAP در اعماق مختلف خاک وجود دارد. نتایج SAP در عمق های خاک تحت کابری مرتع ۲۰-، ۰-، ۴۰-، ۶۰-، ۸۰-، ۶- و ۱۰۰-۸۰ به

ترتیب میانگین ۲۸/۹، ۲۸/۳، ۲۹/۱، ۲۹/۵ و ۲۹/۹ میلی گرم بر کیلوگرم مشاهده شد که تا عمق ۴۰ سانتی متر، روند کاهشی سپس افزایشی را نشان داد و در کشتزارها به ترتیب ۲۸/۵، ۲۶/۸، ۲۵/۳، ۲۶/۱۲ و ۲۵/۳ میلی گرم بر کیلوگرم به طور نامنظم SAP کاهش یافت. Çimrin (2020) به منظور ارزیابی تأثیر ویژگی های خاک بر فسفر قابل استفاده در خاک های آهکی گزارش کرد در تمامی خاک های مورد بررسی با افزایش عمق از ۱۲-۰، ۳۰-۱۲، ۵۵-۳۰، ۸۵-۵۵ و بیشتر از ۸۵ سانتی متر، فسفر قابل جذب کاهش یافت.

مطابق نتایج جدول ۵، میانگین SSP و SAP تحت کشت ذرت نسبت به شرایط بدون کشت مقادیر کمتری را نشان می دهد. باتوجه به اینکه مقادیر مصرفی کود و شرایط تزریق کودآبیاری برای هر دو خاک تحت کشت و بدون آن یکسان می باشد این اختلاف احتمالاً می تواند جذب فسفر توسط گیاهان در طول دوره از رویداد اول تا دوم کوددهی نسبت داده شود. حضور گیاه و سیستم ریشه زایی با ایجاد خلل و فرج و تغییر ساختمان خاک فرآیند آبشویی کود را تحت تأثیر می گذارد. احتمالاً به دلیل افزایش در رشد طولی ذرت و مصرف کود فسفاتی به منظور تامین نیاز غذایی، میانگین فسفر در شرایط تحت کشت کمتر از خاک بدون ذرت نشان داده شد.

نتایج میانگین SSP نشان می دهد در دوره دوم کودآبیاری نسبت به دوره اول بیشتر است. لذا احتمالاً باتوجه به تزریق کودآبیاری در مرحله اول، خاک قبل از کودآبیاری در مرحله دوم تاحدودی غنی تر از خاک بدون کوددهی شده است لذا در مرحله دوم کوددهی میانگین مقادیر فسفر محلول در خاک بیشتر گزارش شده است. همچنین می توان خاطر نشان کرد با ورود کود در مرحله دوم تعادل بین فرم های محلول و قابل استفاده تغییر نموده و با سرعت متفاوت تری به یکدیگر تبدیل می شوند. شاید بتوان گفت اینگونه بررسی ها می تواند کمک به ارزیابی سینتیک جذب و رهاسازی فسفر توسط خاک نماید و تحقیقات بیشتری در این زمینه را می طلبد.

فاصله از محل تزریق، بر روند توزیع فسفر در خاک تأثیر گذار می باشد. نتایج حاکی از آن است که در نزدیکی محل تزریق (L5) توزیع فسفر و مقادیر آن بیشتر از فاصله ۱۰ سانتی متر (L10) می باشد. Ben-Gal (2003) تأثیر دو آبیاری مکرر را بر تحرک فسفر، در دسترس بودن و جذب فسفر توسط ذرت تحت کودآبیاری قطره ای مورد مطالعه قرار دادند. کودآبیاری فسفر الگوهای توزیع سه بعدی فسفر قابل استفاده را ۲۰ تا ۲۵ درصد در محل قطره چکان های مجاور افزایش داد. Wang et al (2017) به بررسی اثرات کوددهی فسفر و توزیع افقی آن بر توزیع فسفر قابل استفاده در خاک و عملکرد ذرت تحت آبیاری قطره ای به صورت آزمایش های گلدانی در سال ۲۰۱۶ پرداختند. ایشان گزارش کردند که عمق جانبی ۱۵ نسبت به ۳۰ سانتی متر، عملکرد ذرت بیشتری داشت. به طور کلی کوددهی فسفر و آبیاری قطره ای برای بهبود راندمان استفاده از کود فسفات توصیه می شود بنظر می رسد که در این روش توزیع یا حرکت جانبی بیشتر از حرکت عمودی به دلیل جریان آب و جبهه رطوبتی باشد. نتایج حاصل از این مطالعه (نمودارهای ۴ و ۵ و جدول ۵) نشان می دهد که توزیع و حرکت عمودی فسفر در سیستم قطره ای تیپ حدود ۱۰ سانتی متر یا کمی بیشتر از آن باشد اما به ۱۵ سانتی متر نمی رسد. حرکت افقی و جانبی ۱۰ سانتی متری و کمی بیشتر از آن می تواند با مقادیر ورودی از قطره چکان مجاور مخلوط شود و لذا حرکت عمودی مسئله مهمتری نسبت به توزیع جانبی فسفر می باشد. نکته حائز اهمیت آنست که در کوددهی باغات و درختان با سیستم آبیاری قطره ای سطحی همانند آنچه در این مطالعه بررسی شد، مقادیر کودهای کاربردی احتمالاً به منطقه رشد ریشه نرسند، لذا بررسی های بیشتر پیشنهاد می شود.

به طور کلی به دلیل خواص منحصر به فرد فسفر در خاک مانند حلالیت کم، تحرک کم و تثبیت زیاد توسط ماتریکس خاک و در دسترس بودن فسفر برای گیاهان، بهتر است کودهای فسفوری به صورت محلول و در فاصله حدود ۵ سانتی متر گیاه زراعی و در تقسیط های بیشتری تزریق شود. نکته بسیار مهم این است که حرکت عنصر فسفر در خاک بسیار محدود و تحرک مناسبی ندارد. متأسفانه روش رایج کوددهی فسفر بین کشاورزان، پخش در سطح زمین می باشد. در این حالت غلظت فسفر در سطح خاک متمرکز می گردد، در حالی که ریشه گیاه در عمق ۲۰ - ۱۰ سانتی متری خاک قرار دارد. در این شرایط به دلیل روش های نادرست استفاده از کود، فسفر در دسترس گیاه قرار نگرفته و گیاه علی رغم کوددهی از کمبود این عنصر رنج می برد. بنابراین با توجه به روش های صحیح نمونه برداری خاک و آنالیز دقیق آن می توان به نیاز یا عدم نیاز کوددهی فسفوری در زراعت ذرت پی برد به دنبال آن استفاده از کودآبیاری و تقسیط های بیشتر به سمت مصرف صحیح فسفر سوق داده می شود.

نتیجه گیری و پیشنهادها

این تحقیق به منظور افزایش دانش در خصوص ارزیابی کودآبیاری در سیستم قطره ای تیپ با نگاهی به حرکت و توزیع فسفر در خاک توام با کاهش تلفات کود و آب و بهینه سازی کوددهی برای حمایت از نیازهای منحصر به فرد انجام شده است. در این مقاله حرکت و توزیع فسفر محلول و قابل استفاده در خاک به صورت افقی و عمودی با حضور گیاه و عدم حضور گیاه ذرت به شیوه کودآبیاری مورد ارزیابی،

بحث و تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج زیر توسط این مطالعه پشتیبانی شد:

کودآبیاری، عمق و زمان بر توزیع SSP و SAP به طور منظم و نامنظم تاثیرگذار می باشد. به عبارت دیگر با کودآبیاری فسفر مقادیر فرم های محلول و قابل استفاده آن در تقسیمات های مختلف متفاوت است. مقادیر فسفر محلول و قابل استفاده اندازه گیری شده در دوره دوم کودآبیاری با میانگین بالاتری نسبت به دوره اول نشان داده شد. میانگین SSP و SAP در شرایط بدون کشت گیاه مقادیر بالاتری نسبت به کشت ذرت را نشان دادند. بیشترین میانگین SSP و SAP در نزدیکی سطح و در عمق صفر تا نهایتاً ۱۰ سانتی متری مشاهده شد و با افزایش عمق میانگین ها کاهش یافته است. اما بین اعماق ۱۰، ۲۰ و ۳۰ تفاوت معنی داری نشان داده نشد. احتمالاً حرکت عمودی فسفر کمی بیشتر از ۱۰ سانتی متر بوده باشد اما به ۱۵ سانتی متر نرسید.

حداکثر میانگین در همه تیمارها در زمان ۹۸ ساعت پس از تزریق کودآبیاری می باشد. پس از آن در زمان ۹۶۰ ساعت به حداقل میانگین رسیده است. این نتیجه بیانگر آنست که فسفر در ۴-۵ روز ابتدایی پس از کودآبیاری به سهولت در دسترس گیاه قرار می گیرد و پس از آن غلظت ها به شرایط اولیه قبل کوددهی می رسند. مقادیر SSP و SAP در نزدیکی محل تزریق (L₅) بیش تر از فاصله ۱۰ سانتی متری (L₁₀) نشان داده شد. اما بهر حال توزیع فسفر تا ۱۰ سانتی متری افقی مشاهده شد که احتمالاً حرکت آن بیش از ۱۰ سانتی متر بوده باشد.

همانطور که در تحقیقات پیشین گزارش شده است تغذیه فسفر گیاهان عمدتاً توسط حرکت فسفر در زنجیره خاک، ریزوسفر-گیاه کنترل می شود (Shen et al., 2011). علاوه بر آن توزیع فسفر در خاک دارای تغییرات مکانی-زمانی قابل توجهی است. معماری ریشه گیاهان که ریشه های بیشتری را به محلی که منابع فسفر در آن قرار دارند توزیع می کند، نقش مهمی در بهره برداری کارآمد از این منابع فسفر دارد. در سال های گذشته در درک خاک، ریزوسفر، و فرآیندهای گیاهی مرتبط با تبدیل فسفر خاک، اکتساب فسفر و پاسخ های کمبود فسفر، پیشرفت های چشمگیری حاصل شده است با این حال بسیاری از جنبه های دینامیک کلی فسفر و حرکت آن در سیستم خاک، ریزوسفر-گیاه و توزیع فسفر در مکان و زمان کاملاً مشخص نیست به طور کلی مطالعه حاضر سوالات اصلی مربوط به استفاده از کودهای فسفر در سیستم های کوددهی قطره ای، نحوه توزیع فسفر در اعماق خاک و تاثیر زمان بر کوددهی را برجسته کرد. به طور کلی مطالب ارائه شده در این مقاله در خصوص توزیع حرکت فسفر و نقش گیاه در مقابل عدم حضور گیاه در خاک به منظور کوددهی قطره ای فسفر برای محققان در زمینه زراعی، کشاورزان و صنایع برای بهبود کارایی استفاده از آب و کودهای فسفر تحت رژیم های کودآبیاری قطره ای مورد توجه قرار خواهد گرفت.

"هیچ گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

- غیبی، محمد نبی، طهرانی، محمد مهدی، و اسدی، فاطمه. ۱۳۹۳. راهنمای مدیریت تلفیقی حاصلخیزی خاک و تغذیه ذرت. دستور العمل فنی ترویجی. موسسه تحقیقات خاک و آب. ۵۶ صفحه. (غیبی و همکاران، ۱۳۹۳).
- رفیعی، حسین، ضرابی، محبوبه، و مهدوی، شهریار. ۱۴۰۱. بررسی توزیع و فراهمی فسفر در حضور ماده آلی و گوگرد عنصری به همراه باکتری تیوباسیلوس در دو خاک آهکی با بافت متفاوت. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۳، شماره ۱. صفحات ۲۶۴۱-۲۶۲۵. (رفیعی و همکاران، ۱۴۰۱).
- کشاورز، پیمان، و مشیری، فرهاد. ۱۴۰۲. مدیریت مصرف فسفر به شیوه کودآبیاری در خاک های آهکی. نشریه ۶۳۳ دستور العمل فنی ترویجی. موسسه تحقیقات خاک و آب. ۲۹ صفحه. (کشاورز و همکاران، ۱۴۰۲).
- شلمانی، میراحمد، ثاقب، نصرت اله، و خراسانی، علی. ۱۳۸۲. استفاده از رادیو ایزوتوپ فسفر-۳۲ در بررسی توزیع کود فسفوری در خاک و اندام های مختلف گیاه گوجه فرنگی، تحت سیستم کود آبیاری قطره ای. مجله علوم کشاورزی ایران. جلد ۳۴، شماره ۴، صفحات ۹۴۷-۹۳۵. (شلمانی و همکاران، ۱۳۸۲).
- اسلامی، محسن، حمیدی، رستمی زاده، علی، و آبادی خواه، دانیال. ۱۳۹۷. چالش حرکت عمودی عنصر فسفر (اوره فسفات) در خاک. دومین همایش ملی پسته ایران. دانشگاه ولی عصر فسنجان. صفحات ۱۰۱-۱۰۲. (اسلامی و همکاران، ۱۳۹۷).

REFERENCES

- Badr, M. A., Abou Hussein, S. D., El-Tohamy, W. A., & Gruda, N. (2010). Nutrient uptake and yield of tomato

- under various methods of fertilizer application and levels of fertigation in arid lands. *Gesunde Pflanzen*, 62(1), 11-19.
- Ben-Gal, A., & Dudley, L. M. (2003). Phosphorus availability under continuous point source irrigation. *Soil Science Society of America Journal*, 67(5), 1449-1456.
- Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils 1. *Agronomy journal*, 54(5), 464-465.
- Campos, H., Cooper, M., Habben, J. E., Edmeades, G. O., & Schussler, J. R. (2004). Improving drought tolerance in maize: a view from industry. *Field crops research*, 90(1), 19-34.
- Chen, Q., Qu, Z., Ma, G., Wang, W., Dai, J., Zhang, M., ... & Liu, Z. (2022). Humic acid modulates growth, photosynthesis, hormone and osmolytes system of maize under drought conditions. *Agricultural Water Management*, 263, 107447.
- Cheng, S., Ke, G., Li, Z., Cheng, Y., & Wu, H. (2021). Soil Available Phosphorus Investigated for Spatial Distribution and Effect Indicators Resulting from Ecological Construction on the Loess Plateau, China. *Sustainability*, 13(22), 12572.
- Chtouki, M., Naciri, R., & Oukarroum, A. (2024). A review on phosphorus drip fertigation in the Mediterranean region: Fundamentals, current situation, challenges, and perspectives. *Heliyon*.
- Chtouki, M., Naciri, R., Garré, S., Nguyen, F., Zeroual, Y., & Oukarroum, A. (2022). Phosphorus fertilizer form and application frequency affect soil P availability, chickpea yield, and P use efficiency under drip fertigation. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 185(5), 603-611.
- Çimrin, K. M. (2020). Relationship between some soil characteristics and contribution on available phosphorus of inorganic phosphorus fractions in calcareous soils. *Mustafa Kemal Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*, 25(2), 138-144.
- Cui, Z., Zhang, H., Chen, X., Zhang, C., Ma, W., Huang, C., & Dou, Z. (2018). Pursuing sustainable productivity with millions of smallholder farmers. *Nature*, 555(7696), 363-366.
- Famiglietti, J. S., Rudnicki, J. W., & Rodell, M. (1998). Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake Hill, Texas. *Journal of hydrology*, 210(1-4), 259-281.
- Gao, X., Zhao, X., Wu, P., Yang, M., Ye, M., Tian, L., ... & Siddique, K. H. (2021). The economic–environmental trade-off of growing apple trees in the drylands of China: A conceptual framework for sustainable intensification. *Journal of Cleaner Production*, 296, 126497.
- Gheibi, M., Tehrani, M. M., & Asadi, F. (2014). Guidelines for Integrated Management of Soil Fertility and Corn Nutrition: Technical Promotional Instructions. *Soil and Water Research Institute*. 56 pp. In Persian.
- Guo, Y., Wang, Z., & Li, J. (2023). Coupling effects of phosphate fertilizer type and drip fertigation strategy on soil nutrient distribution, maize yield and nutrient uptake. *Agricultural Water Management*, 290, 108602.
- Islami, M., Hamidi, N., Abadi Khah, D., & Heydari Salehabad, M. (2018). Challenges of Vertical Movement of Phosphorus (Phosphate Fertilizer) in Soil. In: *Proceedings of the Second National Conference on Pistachio in Iran*, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, 101-102. In Persian.
- Keshavarz, P., & Moshiri, F. (2023). Management of phosphorus fertigation in calcareous soils. Publication No. 633. Technical Promotional Instructions. *Soil and Water Research Institute*. 29 pp. In Persian.
- Khan, A., Tan, D. K. Y., Munsif, F., Afridi, M. Z., Shah, F., Wei, F., ... & Zhou, R. (2017). Nitrogen nutrition in cotton and control strategies for greenhouse gas emissions: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 23471-23487.
- Li, J., Xu, X., Lin, G., Wang, Y., Liu, Y., Zhang, M., ... & Zhang, Y. (2018). Micro-irrigation improves grain yield and resource use efficiency by co-locating the roots and N-fertilizer distribution of winter wheat in the North China Plain. *Science of the total environment*, 643, 367-377.
- Li, Y., Liu, X., Fang, H., Shi, L., Yue, X., & Yang, Q. (2021). Exploring the coupling mode of irrigation method and fertilization rate for improving growth and water-fertilizer use efficiency of young mango tree. *Scientia Horticulturae*, 286, 110211.
- Marschner, H. (1995). Mineral nutrition of higher plants 2nd edn. *Institute of Plant Nutrition University of Hohenheim: Germany*.
- McLean, E. O. 1988. Soil pH and lime requirement. In: Page, A. L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis*. Part, American Society of Agronomy, *Soil Science Society of America, Madison, Wis.*, Pp. 199-224.
- Neumann, G., & Römheld, V. (2002). Root-induced changes in the availability of nutrients in the rhizosphere. In Y Waisel, A Eshel, U Kafkafi, eds, *Plant Roots, The Hidden Half*, Ed 3. Marcel Dekker, Inc., New York, pp.617–649.
- Owens, P. N., Deeks, L. K., Wood, G. A., Betson, M. J., Lord, E. I., & Davison, P. S. (2008). Variations in the

- depth distribution of phosphorus in soil profiles and implications for model-based catchment-scale predictions of phosphorus delivery to surface waters. *Journal of Hydrology*, 350(3-4), 317-328.
- Qu, Z., Chen, Q., Yin, S., Feng, H., Liu, Y., & Li, C. (2024). Effects of drip irrigation coupled with controlled release potassium fertilizer on maize growth and soil properties. *Agricultural Water Management*, 301, 108948.
- Rafiee, H., Zarabi, M., & Mahdavi, S. (2022). Investigating phosphorus distribution and availability in the presence of organic matter and elemental sulfur along with thiobacillus bacteria in two soils with different textures. *Iranian Journal of Water and Soil Research*, 53 (1), 2625-2641. In Persian.
- Richardson, A. E., Barea, J. M., McNeill, A. M., & Prigent-Combaret, C. (2009). Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms.
- Shalmany, M. A., Saghafi, N. A., & Khorasani, A. (2003). Utilization of phosphorus-32 radioisotope to investigate the distribution of phosphate fertilizer in soil and different parts of tomato plants under drip fertilizer irrigation system. *Iranian Journal of Agricultural Sciences*, 34 (4), 935-947. In Persian.
- Sharma, K., Sharma, J. C., Sharma, S., Sharma, N., Sharma, R., Ananthakrishnan, S., & Abd_Allah, E. F. (2024). Optimizing leaf nutrient status, growth, and yield parameters in high-density apple orchards (cv. Super chief) via integrated drip irrigation and fertigation techniques. *Heliyon*, 10(16).
- Shen, J., Yuan, L., Zhang, J., Li, H., Bai, Z., Chen, X. & Zhang, F. (2011). Phosphorus dynamics: from soil to plant. *Plant physiology*, 156(3), 997-1005.
- Tao, R., Wakelin, S. A., Liang, Y., Hu, B., & Chu, G. (2018). Nitrous oxide emission and denitrifier communities in drip-irrigated calcareous soil as affected by chemical and organic fertilizers. *Science of the Total Environment*, 612, 739-749.
- Shi, Y., Chen, M., Wang, X., Yang, H., Yu, H., & Hao, X. (2023). Efficiency analysis and evaluation of centrifugal variable-rate fertilizer spreading based on real-time spectral information on rice. *Computers and Electronics in Agriculture*, 204, 107505.
- Shirazi, M. A., & Boersma, L. (1984). A unifying quantitative analysis of soil texture. *Soil Science Society of America Journal*, 48(1), 142-147.
- Srivastav, A. L., Patel, N., Rani, L., Kumar, P., Dutt, I., Maddodi, B. S., & Chaudhary, V. K. (2024). Sustainable options for fertilizer management in agriculture to prevent water contamination: a review. *Environment, Development and Sustainability*, 26(4), 8303-8327.
- Tariq, M., Rozina, G., Fazal, M., Fazal, J., Zahid, H., Nadia, N., Hamayoon, K. & Hayatullah, K. (2011). Effect of different phosphorus levels on the yield and yield components of maize. *Sarhad Journal Agriculture*, 27, 165-170.
- Teramage, M. T., Asfaw, M., Demissie, A., Feyissa, A., Ababu, T., Gonfa, Y., & Sime, G. (2023). Effects of land use types on the depth distribution of selected soil properties in two contrasting agro-climatic zones. *Heliyon*, 9(6).
- Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., & Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418(6898), 671-677.
- van der Putten, W. H., Bardgett, R. D., Farfan, M., Montanarella, L., Six, J., & Wall, D. H. (2023). Soil biodiversity needs policy without borders. *Science*, 379(6627), 32-34.
- Wang, Z., Li, J., Hao, F., & Li, Y. (2017). Effects of phosphorus fertigation and lateral depths on distribution of Olsen-P in soil and yield of maize under subsurface drip irrigation. In *2017 ASABE Annual International Meeting* (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Zhang, F., Shen, J., Zhang, J., Zuo, Y., Li, L., & Chen, X. (2010). Rhizosphere processes and management for improving nutrient use efficiency and crop productivity: implications for China. *Advances in agronomy*, 107, 1-32.
- Zhang, W., Lu, J. S., Bai, J., Khan, A., Liu, S. T., Zhao, L., ... & Xiong, Y. C. (2024). Introduction of soybean into maize field reduces N2O emission intensity via optimizing nitrogen source utilization. *Journal of Cleaner Production*, 442, 141052.
- Zong, R., Wang, Z., Zhang, J., & Li, W. (2021). The response of photosynthetic capacity and yield of cotton to various mulching practices under drip irrigation in Northwest China. *Agricultural Water Management*, 249, 106814.