



Evaluation of the effects of subsurface drip and furrow irrigation on the soil mineral phosphorus fractions in sugarcane cultivation

Jamal Saudi¹ | Ali Afrous^{2✉} | Kamran Mohsenifar¹ | Teimour Babaeinejad¹ | Mehdi Asadi Lour³

1. Department of Soil Science, Ahv.C., Islamic Azad University, Ahvaz, Iran, Email: farabi.cane2024@gmail.com

2. Corresponding author, Department of Environmental Engineering, NT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran, Email:

Afrous@iau.ac.ir

3. Department of Water Engineering and Sciences, Ahv.C., Islamic Azad University, Ahvaz, Iran, Email:

mohsenifar@live.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: March. 24, 2025

Revised: Oct. 14, 2025

Accepted: Oct. 27, 2025

Published online: Dec. 2025

Keywords:

*Dicalcium phosphate,
Octacalcium phosphate,
Phosphorus fractions,
Subsurface drip irrigation,
Sugarcane*

ABSTRACT

The purpose of this study is to compare of subsurface drip irrigation (SDI) and surface irrigation on the soil phosphorus fractionation in sugarcane cultivation in Hakim Farabi Company in Khuzestan province. For this purpose, soil sampling was carried out in two separate fields with SDI and surface irrigation systems at 30, 90, 150 and 210 days after planting and at two depths (0-15 and 15-30 cm). Average sugarcane growth, as an indicator of root activity and biomass production, in SDI was about 54% higher than the surface irrigation method. In both irrigation methods, all phosphorus fractions were decreased over time up to 210 days after planting. In SDI, Ca8-P (11 mg/kg decrease) and Ca10-P (10.7 mg/kg decrease) and a lesser extent Fe-P (8 mg/kg decrease) showed the greatest decrease respectively, which indicate greater use of phosphorus from these components by sugarcane, while the order of decrease in furrow irrigation was Fe-P (8.7 mg/kg decrease), O-P (7.7 mg/kg decrease), and Ca10-P (7 mg/kg decrease). The Ca8-P fraction, as a chemical fraction of phosphorus in calcareous soils that plays a major role in providing plant available phosphorus and converting to Ca2-P. In SDI, The Ca8-P fraction decreased from concentration of 100.3 mg/kg to 89.3 mg/kg over time (from T1 to T4), while in the furrow irrigation method this phosphorus fraction was changed from 105 to 102 mg/kg. The average relative proportions of various phosphorus fractions were ordered as Ca10-P (48.7%) > Ca8-P (37.2%) > Fe-P (6.7%) > O-P (4.2%) > Al-P (2.6%) > Ca2-P (0.5%). Therefore, the type of irrigation method is effective in the distribution and amount of phosphorus fractions in the soil, because it affects plant root activity and microorganism activity. This resulted that SDI had a greater reduction in phosphorus fractions compared to surface irrigation.

Cite this article: : Saudi, J., Afrous, A., Mohsenifar, K., Babaeinejad, T., & Asadi Lour, M. (2025). Evaluation of the effects of subsurface drip and furrow irrigation on the soil mineral phosphorus fractions in sugarcane cultivation., *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (10), 2887-2905. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.392448.669908>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.392448.669908>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Subsurface drip irrigation (SDI) involves the application of small amounts of water directly to the plant's root zone. In SDI, sufficient amounts of water and nutrients (based on required by the plant) are placed in the root zone. Indirect effects of SDI on plant nutrition include: 1) improving the moisture content in the root zone and consequently soil ventilation, 2) effect on the concentration of nutrients in the soil solution and the distance of diffusion to the root surface, and 3) changes in the availability of nutrients due to improved activity of microorganisms. Due to the differences in the amount of water used in various irrigation methods, distinct chemical phosphorus fractions various in the soil can be expected. Due to the lack of studies on the effects of SDI and surface irrigation methods on various phosphorus fractions in sugarcane cultivation, this study was conducted to investigate phosphorus fractions in the soil in the two mentioned irrigation methods.

Materials and Methods

For soil sampling during the plant growth period and subsequent analyses, a furrow was randomly selected from odd-numbered irrigation sections (1, 3, 5, 7, and 9) in the SDI field. Four stations were established along each furrow at predetermined intervals for soil sampling. A similar sampling strategy was employed in the control (furrow irrigation) field. Sampling was done at 30 (T1), 90 (T2), 150 (T3) and 210 (T4) days after planting. In order to phosphorus fractionation, soil samples were combined and subsamples were selected in triplicate. Soil samples were collected at horizontal distances of 20 cm from the drip irrigation pipes and at vertical depths of 0–15 cm, 15–30 cm.

In order to compare the two irrigation methods, germination and weekly growth were measured. The procedure of sequential extraction was performed according to Jiang and Gu (1989) who separated six phosphorus fractions: (1) dicalcium phosphate ($\text{Ca}_2\text{-P}$); (2) Octacalcium phosphate ($\text{Ca}_8\text{-P}$); (3) Al-phosphate (Al-P); (4) phosphorus associated with free iron oxide (Fe-P); (5) phosphorus occluded in crystalline Fe oxides (O-P); and (6) apatite ($\text{Ca}_{10}\text{-P}$).

Results and Discussion

Average sugarcane growth, as an indicator of root activity and biomass production, in SDI was about 54% higher than the surface irrigation method. The sugarcane height measured at the end of experiment was 65.3 and 49.2 cm in SDI and surface irrigation methods, respectively. In both irrigation methods, all phosphorus fractions were decreased over time up to 210 days after planting. More difference of octacalcium phosphate fraction between two irrigation methods with plant growth could be an indicator of greater uptake of phosphorus by sugarcane from this fraction. In SDI, $\text{Ca}_8\text{-P}$ (11 mg/kg decrease) and $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ (10.7 mg/kg decrease) and a lesser extent Fe-P (8 mg/kg decrease) showed the greatest decrease respectively, which indicate greater use of phosphorus from these components by sugarcane, while the order of decrease in furrow irrigation was Fe-P (8.7 mg/kg decrease), O-P (7.7 mg/kg decrease), and $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ (7 mg/kg decrease). The average relative proportions of various phosphorus fractions were ordered as $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ (48.7%) > $\text{Ca}_8\text{-P}$ (37.2%) > Fe-P (6.7%) > O-P (4.2%) > Al-P (2.6%) > $\text{Ca}_2\text{-P}$ (0.5%). In both irrigation methods, the labile and readily absorbable fraction of dicalcium phosphate ($\text{Ca}_2\text{-P}$) constitutes less than one percent of total phosphorus fractions, while the highest percentage of abundance is related to $\text{Ca}_{10}\text{-P}$, followed by octacalcium phosphate ($\text{Ca}_8\text{-P}$). Although the irrigation method was effective in the amounts of some chemical fractions, it did not different in the percentage of these fractions, especially in the stable chemical forms of calcium phosphate. The main reason is the very high amounts of calcium phosphates in calcareous soils in arid and semi-arid region.

Conclusion

The irrigation method is effective in the distribution and amount of phosphorus fractions in the soil, because it affects plant root activity and microorganism activity. This resulted that SDI had a greater reduction in phosphorus fractions compared to surface irrigation.

Author contributions

J.S: designed and carried out the experimental work, collected and analyzed the data, conceptualization, writing – original draft, writing – review and editing. A.A and K.M: contributed to the design and interpretation of the results, writing – review and editing, revised the final version of the manuscript. T.B: reviewed the various versions of the article manuscript. M.A.L: contributed to the design experiment, Supervision. All authors have contributed to this scientific work to its publication.

Data Availability Statement

Not applicable.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct. This article does not contain any studies with human participants or animals.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

ارزیابی اثرات روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و روش جویچه‌ای بر مقادیر اجزاء فسفر معدنی خاک در کشت نیشکر

جمال سعودی^۱ | علی افروس^۲ | کامران محسنی فر^۱ | تیمور بابائی نژاد^۱ | مهدی اسدی لور^۳۱. گروه علوم خاک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران. رایانامه: farabi.cane2024@gmail.com۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی محیط زیست، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: Afrous@iaui.ac.ir۳. گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران. رایانامه: mohsenifar@live.com

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱/۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۷/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۸/۵

تاریخ انتشار: دی ۱۴۰۴

واژه‌های کلیدی:

آبیاری قطره‌ای زیرسطحی،

اجزاء شیمیایی فسفر،

اکتاکلسیم فسفات،

دی‌کلسیم فسفات،

نیشکر.

این مطالعه با هدف مقایسه تأثیر آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و آبیاری جویچه‌ای بر اجزاء شیمیایی فسفر در خاک در کشت نیشکر در شرکت حکیم فارابی خوزستان انجام شد. به این منظور نمونه‌برداری خاک در دو مزرعه جداگانه با سیستم‌های آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و آبیاری جویچه‌ای در زمان‌های ۳۰، ۹۰، ۱۵۰ و ۲۱۰ روز پس از کشت نیشکر و در دو عمق ۱۵-۰ و ۳۰-۱۵ سانتی‌متری انجام شد. مقایسه میانگین رشد نیشکر در بازه زمانی مورد بررسی به‌عنوان شاخصی از اثر نوع آبیاری در فعالیت ریشه گیاه و تولید زیست‌توده نشان داد که متوسط رشد نیشکر در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی حدود ۵۴ درصد بیشتر از روش آبیاری جویچه‌ای بود. در هر دو روش آبیاری، با گذشت زمان تا ۲۱۰ روز روند کاهشی در همه اجزاء شیمیایی فسفر خاک قابل مشاهده بود. از اجزاء شیمیایی فسفر، Ca8-P (۱۱ میلی‌گرم در کیلوگرم کاهش) و Ca10-P (۷/۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کاهش) و به مقدار کمتر Fe-P (۸ میلی‌گرم در کیلوگرم کاهش) به‌ترتیب بیشترین کاهش را در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نشان دادند که می‌تواند نشان‌دهنده استفاده بیشتر فسفر از این اجزاء توسط نیشکر در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی باشد در حالی که ترتیب کاهش در آبیاری جویچه‌ای به‌صورت Fe-P (۷/۸ میلی‌گرم در کیلوگرم کاهش)، O-P (۷/۷ میلی‌گرم در کیلوگرم کاهش) و Ca10-P (۷ میلی‌گرم در کیلوگرم کاهش) می‌باشد. جزء شیمیایی Ca8-P به‌عنوان ترکیب شیمیایی فسفر در خاک‌های آهکی که نقش کلیدی در تامین فسفر قابل استفاده گیاه و تبدیل شدن به Ca2-P دارد در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی از ابتدا با غلظت ۱۰۰/۳ میلی‌گرم در کیلوگرم تا ۸۹/۳ میلی‌گرم در کیلوگرم تا آخرین زمان اندازه‌گیری کاهش یافت در حالی که در روش آبیاری جویچه‌ای این کاهش از ۱۰۵ تا ۱۰۲ میلی‌گرم در کیلوگرم مشاهده شد. ترتیب اجزاء شیمیایی فسفر در هر دو روش آبیاری از بیشترین تا کمترین درصد فراوانی به‌صورت Ca10-P (۰.۵%) > Ca2-P (۲.۶%) > Al-P (۴.۲%) > O-P (۶.۷%) > Fe-P (۳۷.۲%) > Ca8-P (۴۸.۷%) می‌باشد. بنابراین نوع روش آبیاری با توجه به اثراتی که در فعالیت ریشه گیاه و فعالیت میکروارگانیسم‌ها دارد در توزیع و مقدار اجزاء شیمیایی فسفر در خاک مؤثر است و خاک در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی دارای کاهش بیشتری در اجزاء فسفر در مقایسه با آبیاری جویچه‌ای بود.

استناد: سعودی، جمال؛ افروس، علی؛ محسنی فر، کامران؛ بابائی نژاد، تیمور؛ و اسدی لور، مهدی (۱۴۰۴). ارزیابی اثرات روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و روش جویچه‌ای بر مقادیر اجزاء فسفر معدنی خاک در کشت نیشکر، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶ (۱۰)،

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.392448.669908>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.392448.669908>

مقدمه

در بسیاری از مناطق به‌ویژه در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک، عدم تعادل میان مصرف و جایگزینی منابع آب منجر به افزایش هزینه‌های تأمین آب به منظور حفظ پتانسیل تولید گیاه شده است. در این شرایط، آگاهی و شناخت بهتر از واکنش عملکرد گیاه و عوامل مؤثر بر عملکرد ناشی از استفاده از روش‌های مختلف آبیاری مهم است (Mohammed & Irmak, 2022). سیستم‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی در نواحی خشک با محدودیت منابع آب و به‌منظور آبیاری گیاهان زراعی به‌دلایل افزایش عملکرد و استفاده از آب کمتر برای گیاه، به‌طور فزاینده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند (El-Nesr et al., 2014; Wu et al., 2019). از ویژگی مهم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی قرار گرفتن مقادیر کافی آب و عناصر غذایی مورد نیاز گیاه در ناحیه ریشه و در نتیجه کاهش محسوس تلفات نفوذ عمقی آن‌ها می‌باشد (Abou Seeda et al., 2020). اثرات غیرمستقیم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در تغذیه گیاه شامل بهبود وضعیت رطوبت در ناحیه ریشه گیاه و در نتیجه تهویه خاک و بنابراین تأثیر در غلظت عناصر غذایی در محلول خاک و انتشار عناصر تا ریشه گیاه و تغییرات در فراهمی عناصر غذایی ناشی از بهبود فعالیت میکروارگانیسم‌ها می‌باشد (Gonçalves et al., 2019; Manikandan & Thiagarajan, 2021). بنابراین علاوه بر مصرف آب، روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی می‌تواند از دیدگاه تغذیه گیاه به‌دلیل افزایش کارایی استفاده از کودهای شیمیایی ناشی از کود آبیاری در این سیستم و افزایش عملکرد مورد توجه قرار گیرد (Wu et al., 2019).

فسفر یکی از عناصر ضروری مورد نیاز نیشکر می‌باشد که با توجه به فرآیند جذب متأثر از انتشار، تحت تأثیر مقدار رطوبت خاک و توسعه و تراکم ریشه قرار می‌گیرد. فسفر به‌عنوان یکی از عناصر اصلی مورد نیاز نیشکر نقش‌های مهمی در رشد گیاه نیشکر دارد. از جمله این نقش‌ها می‌توان به فتوسنتز، توسعه ریشه، پنجه‌زنی، عملکرد و کیفیت شربت نیشکر اشاره کرد (Safirzadeh et al., 2019). برخلاف آنالیز فسفر کل، توزیع میان جزءهای مختلف برای تحرک فسفر مهم است (Jalali & Ranjbar, 2010). در خاک‌های با pH زیاد، فسفر در خاک عمدتاً به صورت پیوند با کلسیم وجود دارد. فسفات‌های کلسیم در خاک نیز به اشکال شیمیایی مختلف وجود دارند که در حلالیت آنها نیز تفاوت وجود دارد. بنابراین بررسی اشکال فسفات کلسیم می‌تواند در قابلیت دسترسی گیاه به فسفر مؤثر باشد. انواع مختلف اجزاء فسفر به طور قابل ملاحظه‌ای از لحاظ تحرک، زیست‌فراهمی و رفتار شیمیایی متفاوت هستند و می‌توانند به یکدیگر تبدیل شوند. مقادیر اجزاء مختلف فسفر می‌تواند زیست‌فراوری برای گیاه و پتانسیل اثرات منفی بر روی محیط‌زیست را نشان دهد (Yin & Liang, 2013). بنابراین جزءبندی فسفر یک روش مؤثر برای بررسی قابلیت دسترسی فسفر غیرآلی خاک و تبدیل اجزاء فسفر به یکدیگر از منابع مختلف فسفر و فسفر السن به عنوان معیاری از قابلیت دسترسی فسفر خاک است (Shen et al., 2004).

پیشینه پژوهش

(Jun et al., 2010) در یک آزمایش مزرعه‌ای بلند مدت در یک خاک آهکی نشان دادند که اضافه کردن کود فسفر به خاک سبب افزایش فسفر کل در خاک شد. همچنین مقادیر اجزاء فسفر به صورت $Ca_{10}-P < Ca_8-P < Fe-P < Al-P < O-P < Ca_2-P$ بودند. اضافه کردن کود شیمیایی فسفر مقادیر Ca_8-P ، $Al-P$ و Ca_2-P را افزایش داد. (Zhang et al., 2012) در مطالعه‌ای بر روی اجزاء فسفر در خاک‌های دارای نوسانات سطح آب به این نتیجه رسیدند که بیشترین فراوانی در اجزاء غیرآلی فسفر خاک به فسفات‌های کلسیم تعلق دارد و پس از آن فسفات‌های آلی و فسفات‌های آهن و آلومینیوم قرار دارند. آنها همچنین نشان دادند که مقدار فسفر آزاد شده از خاک رابطه مثبتی با مقدار فسفر آلی و فسفات‌های آهن و آلومینیوم دارد که این اجزاء به عنوان منابع آزادکننده سریع فسفر در خاک شناخته شدند. (Mahgoub et al., 2014) در مطالعه‌ای نشان دادند که توزیع و تراکم ریشه در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی متفاوت می‌باشد و همچنین در توزیع عناصر غذایی مؤثر است. نتایج آنها نشان داد که در روش آبیاری قطره‌ای غلظت فسفر قابل استفاده در سطح خاک بیشتر بود و در عمق خاک کاهش می‌یافت در حالی که پتاسیم قابل استفاده تمایل به حرکت افقی و رو به پایین داشت. در شرایط آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با بهبود شرایط رطوبت خاک به دلیل تأمین مداوم آب، فراهمی عناصر غذایی و در نتیجه جذب عناصر توسط گیاه می‌تواند تحت تأثیر قرار گیرد. (Dharumarajan & Singh, 2014) در پژوهشی تأثیر سیستم‌های کشت ثابت، برنج-برنج و برنج-سیب‌زمینی را بر روی اجزاء فسفر در خاک مورد ارزیابی قرار دادند. ترتیب فراوانی اجزاء فسفر به صورت فسفات کلسیم، فسفات آهن و فسفات آلومینیوم بود. نتایج نشان داد که در سیستم کشت ثابت (درخت)، فسفات کلسیم جزء غالب فسفر در خاک بود در حالی که در سیستم کشت برنج-برنج، فسفات‌های آهن و آلومینیوم غالب بودند. (Bibi et al., 2022) به‌منظور مقایسه وضعیت فسفر در خاک چند نوع باغ و نمونه شاهد از جزءبندی فسفر استفاده



کردند. نتایج نشان داد که به طور کلی در نمونه‌های خاک انواع باغ، اجزاء فسفر بیشتر از نمونه‌های خاک شاهد بودند و بیشترین مقادیر اجزاء فسفر در خاک سطحی مشاهده شد. (Adhami et al., 2012) تغییرات اجزاء مختلف فسفر را در دو سطح فسفر و در دو شرایط رطوبتی ظرفیت زراعی و غرقاب مورد بررسی قرار دادند. کاهش دی‌کلسیم فسفات با افزایش زمان انکوباسیون نشان داد که این کاهش در رژیم رطوبتی غرقابی بیشتر از رژیم رطوبتی ظرفیت زراعی بود. همچنین فسفر متصل به اکسیدهای آهن و آلومینیوم آزاد و کریستالی در شرایط غرقابی بیشتر از ظرفیت زراعی بود. بنابراین مقدار و نحوه توزیع رطوبت در خاک می‌تواند در فراهمی و توزیع عناصر غذایی از جمله فسفر مؤثر باشد. فراهمی عناصر غذایی در خاک برای گیاه به غلظت آن عناصر در محلول خاک بستگی دارد که ترکیب شیمیایی محلول خاک نیز متأثر از رطوبت خاک است. با توجه به این که در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، مقدار و توزیع رطوبت در خاک متفاوت از روش آبیاری جویچه‌ای است که این اختلاف نیز منجر به تفاوت در فعالیت ریشه گیاه و جذب عناصر غذایی از جمله فسفر از خاک می‌شود، بنابراین اجزاء مختلف فسفر در روش‌های مختلف آبیاری می‌توانند متفاوت باشند. بنابراین با توجه به نیاز بررسی جنبه‌های مختلف اثرات آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بر گیاه نیشکر و خاک به منظور توسعه بیشتر این روش آبیاری و با توجه به عدم مطالعه اثر روش‌های آبیاری جویچه‌ای و قطره‌ای زیرسطحی در زراعت نیشکر بر تغییرات اجزاء شیمیایی مختلف فسفر در خاک، این مطالعه به منظور بررسی اجزاء فسفر در خاک در دو روش آبیاری مذکور در سطح مزرعه‌ای انجام شد.

روش‌شناسی پژوهش

مزارع مورد استفاده به منظور اجرای آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و آبیاری مرسوم جویچه‌ای در شرکت کشت و صنعت نیشکر حکیم فارابی در استان خوزستان ($36^{\circ}48'E$, $30^{\circ}59'N$) انتخاب شدند. به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای طرح، در هر دو مزرعه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و شاهد از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری، نمونه‌برداری خاک انجام گردید و توزیع اندازه ذرات به روش هیدرومتری (Bouyoucos, 1961)، هدایت الکتریکی (EC) و pH در عصاره گل اشباع (Rhoades, 1996)، فسفر قابل استخراج توسط روش السن و همکاران (Olsen et al, 1954) و پتاسیم قابل استفاده با استفاده از روش استات آمونیوم ۰/۵ مولار (Knudsen et al., 1982) و درصد کربن آلی به روش اکسیداسیون تر (Nelson & Sommers, 1996) در نمونه‌های خاک تعیین شدند. بافت خاک در هر دو مزرعه لوم رسی بود. مقادیر شوری خاک در مزرعه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و شاهد به ترتیب برابر ۲/۸۱ و ۲/۷۸ دسی‌زیمنس بر متر بود و مقدار pH به ترتیب برابر ۷/۸۱ و ۷/۸۵ بود. مقدار کربن آلی خاک در هر دو مزرعه برابر ۰/۳۵ درصد بود که کم بودن کربن آلی از ویژگی‌های خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌باشد. مقدار فسفر و پتاسیم قابل استفاده در خاک مزرعه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی به ترتیب برابر ۳/۴۴ و ۹۲/۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. در خاک مزرعه آبیاری سطحی، مقادیر فسفر و پتاسیم قابل استفاده به ترتیب برابر ۳/۶۳ و ۸۹/۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شد.

پس از انجام عملیات مختلف تهیه زمین از قبیل زیرشکنی، شخم، دیسک و ماله، بستر مناسب قرار دادن لوله‌های آبد در مزرعه آماده شد. هر روش آبیاری به طور جداگانه در مزارعی به مساحت ۲۲ هکتار اجرا گردید. در هر دو روش آبیاری جویچه‌ای و روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی تعداد پشته‌های کشت برابر ۵۰۹ عدد بود و به این ترتیب در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی تعداد ۵۰۹ لوله آبد (لترال) در مزرعه کار گذاشته شد. قطره‌چکان‌های با دبی ۲/۴ لیتر در ساعت و فاصله ۵۰ سانتی‌متر با عمق کارگذاری ۲۰ سانتی‌متر انتخاب گردید و در طراحی در نظر گرفته شد (شین‌دشتگل و همکاران، ۱۳۹۹؛ شینی‌دشتگل و همکاران، ۱۴۰۳). لوله‌های آبد توسط دستگاه لوله‌گذار به فواصل ۱/۸۳ متر از یکدیگر قرار گرفتند. قبل از کشت در هر دو مزرعه کود فسفر از منبع سوپرفسفات تریپل بر اساس نتایج آزمون خاک، اضافه گردید. سپس نیشکر (رقم CP69-1062) به صورت دو ردیفه در اطراف لوله قطره‌چکان‌دار (لوله لترال) کشت شد. نیاز آبیاری برای هر دو مزرعه به صورت یکسان و بر اساس اطلاعات روزانه تحت تبخیر کلاس A در ایستگاه هواشناسی شرکت حکیم فارابی محاسبه شد.

به منظور نمونه‌برداری خاک در طول دوره رشد گیاه و بررسی اجزاء مختلف فسفر، از هر یک از شاخص‌های فرد مزرعه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی (۱، ۳، ۵، ۷ و ۹) یک جویچه به صورت تصادفی انتخاب گردید و در طول هر جویچه تعداد چهار ایستگاه به فواصل معین تعیین شد. در مزرعه شاهد نیز به همین روش مکان‌های نمونه‌برداری خاک تعیین شد. نمونه‌برداری‌ها در زمان‌های ۳۰ (T1)، ۹۰ (T2)، ۱۵۰ (T3) و ۲۱۰ (T4) روز پس از کشت انجام شد. در هر مزرعه و در هر زمان نمونه‌برداری، نمونه‌های خاک هر عمق، به طور جداگانه با یکدیگر ترکیب شدند (نمونه مرکب) و از نمونه مرکب به دست آمده از هر عمق نمونه‌برداری تعداد ۳ نمونه به منظور تکرار جهت بررسی اجزاء فسفر

جدا شدند. نمونه‌برداری خاک از فواصل افقی ۲۰ سانتی‌متری لوله قطره‌چکان‌دار و از اعماق ۱۵-۰ و ۳۰-۱۵ سانتی‌متری انجام شد. به منظور مقایسه دو روش آبیاری در یکنواختی جوانه‌زنی و سبز شدن و فعالیت مناسب ریشه گیاه با توجه به مزایایی که در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بیان شده است، در هر مزرعه تعداد ۹ ایستگاه انتخاب شدند و شمارش تعداد جوانه‌های سبز شده در طول ۱۰ متر در هر ایستگاه از سوم آذر ۱۴۰۰ شروع گردید و هر ۱۰ روز یکبار تا ۱۰ اردیبهشت ۱۴۰۱ ادامه داشت. به منظور اندازه‌گیری رشد هفتگی، در هر شاخص تعداد دو ایستگاه (یکی قسمت جلو و دیگری پشت مزرعه) انتخاب شدند و با تعیین گیاه شاخص، تغییرات ارتفاع هفتگی مورد اندازه‌گیری قرار می‌گرفت (در مجموع ۱۸ ایستگاه در هر مزرعه) و در مزرعه شاهد نیز به همین ترتیب انجام شد. در خاکهای آهکی، فسفر عمدتاً در ترکیب با کلسیم به صورت شکل‌های شیمیایی مختلف فسفات کلسیم می‌باشد (Jun et al., 2010). به آن جهت که شکل‌های مختلف فسفات کلسیم دارای خصوصیت شیمیایی و حالیت‌های مختلفی هستند که می‌تواند قابلیت دسترسی فسفر را تحت تأثیر قرار دهد، لذا بررسی این شکل‌های شیمیایی فسفر در خاک آهکی دارای اهمیت است. (Jiang & Gu, 1989) روشی را برای تفکیک شکل‌های شیمیایی فسفر در خاک‌های آهکی ارائه دادند که فسفات کلسیم را به سه دسته تقسیم می‌کند. بنابراین به منظور جزءبندی فسفر در خاک از روش (Jiang & Gu, 1989) که تلفیقی از روش (Chang & Jackson, 1957) و (Hedley et al., 1982) است استفاده شد که به شرح جدول زیر می‌باشد. اجزاء شیمیایی فسفر در این روش عبارتند از: ۱- فسفر محلول (Ca₂-P)، ۲- فسفات کلسیم پدوژنیک یا فسفات کلسیم نسبتاً محلول (Ca₈-P)، ۳- فسفات آلومینیوم (Al-P)، ۴- فسفات پیوند شده با اکسیدهای آهن (Fe-P)، ۵- فسفات محبوس شده در اکسیدهای آهن بلوری (O-P) و ۶- آپاتیت لیتوژنیک (Ca₁₀-P).

جدول ۱. توزیع نسبی فسفر غیرآلی برای خاکهای آهکی براساس روش جیانگ و گو (۱۹۸۹)

مرحله	جزء شیمیایی فسفر	عصاره گیر	pH	زمان تکان دادن
۱	Ca ₂ -P	0.25 M NaHCO ₃	۷/۵	یک ساعت
۲	Ca ₈ -P	0.5 M NH ₄ OAC	۴/۲	۴ ساعت ایست-یک ساعت
۳	Al-P	0.5 M NH ₄ F	۸/۲	یک ساعت
۴	Fe-P	0.1 M NaOH-0.1 M Na ₂ CO ₃	-	دو ساعت-۱۶ ساعت ایست-دو ساعت
۵	O-P	0.3 M Na ₃ C ₆ H ₅ O ₇ -Na ₂ S ₂ O ₄ -NaOH	-	حمام آب گرم
۶	Ca ₁₀ -P	0.25 M H ₂ SO ₄	-	یک ساعت

این تحقیق به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی اجرا شد. فاکتورهای مورد بررسی شامل نوع آبیاری (آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و آبیاری جویچه‌ای)، زمان نمونه‌برداری (۳۰، ۹۰، ۱۵۰ و ۲۱۰ روز پس از کشت) و عمق نمونه‌برداری (۱۵-۰ و ۳۰-۱۵ سانتی‌متر) بودند. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون توکی در سطح معنی‌داری ۵ درصد ($P < 0.05$) انجام شد. کلیه تجزیه و تحلیل‌های آماری به صورت جدول ANOVA توسط نرم‌افزار ۱۶ MINITAB و رسم نمودار با استفاده از Excel-MS انجام گردید.

نتایج و بحث

به منظور بررسی دو روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و آبیاری جویچه‌ای بر بخش هوایی گیاه و توسعه گیاه نیشکر، جوانه‌شماری و رشد هفتگی به عنوان شاخص‌های گیاهی اندازه‌گیری شدند.

جوانه شماری

نتایج مقایسه تعداد جوانه سبز شده در دو روش آبیاری نشان داد (شکل ۱) که از ابتدا تا فروردین سال ۱۴۰۱، تعداد جوانه سبز شده در روش آبیاری جویچه‌ای بیشتر از آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بود به طوری که میانگین تعداد جوانه در این بازه زمانی در روش آبیاری جویچه‌ای ۳۰ درصد بیشتر از روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بود. این نتیجه می‌تواند در ابتدا ناشی از اثرات آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در عدم تأمین رطوبت مناسب خاک به منظور جوانه‌زنی یکنواخت باشد. بعد از این زمان نتایج اندازه‌گیری نشان داد که تعداد جوانه در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بیشتر از روش آبیاری جویچه‌ای بود به طوری که میانگین این اختلاف ۲۶ درصد بود. این می‌تواند ناشی از ایجاد شرایط رطوبتی مناسب به طور مستقیم و اثرات غیرمستقیم رطوبت مناسب در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی مانند توسعه بیشتر ریشه (زنگنه یوسف‌آبادی،

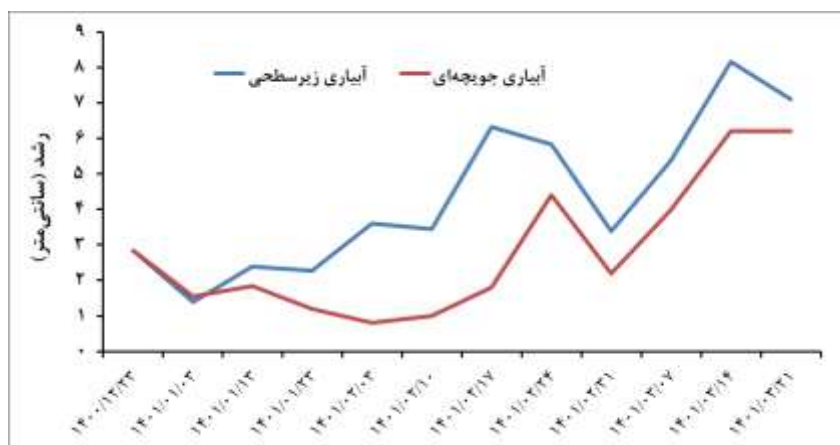


۱۳۹۷؛ شینی دشتگل، ۱۳۹۹)، اثرات تغذیه‌ای و تهویه مناسب و بهبود فعالیت میکروارگانیسم‌ها بر افزایش تعداد جوانه‌زنی و پنبه‌زنی باشد.



شکل ۱. مقایسه تعداد جوانه سبز شده در دو روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و آبیاری جویچه‌ای رشد گیاه

به دلیل این که اندام زیرزمینی و بخش هوایی گیاه با یک نسبت مشخص در ارتباط هستند، رشد گیاه نیشکر می‌تواند شاخصی از تولید زیست‌توده باشد که به طور غیرمستقیم در ارتباط با فعالیت ریشه گیاه به عنوان اندام زیرزمینی است. به این منظور مبنای اندازه‌گیری و مقایسه رشد از تاریخ ۲۳ اسفند ۱۴۰۰ در نظر گرفته شد (در زمان شروع فعالیت رشدی گیاه نیشکر در استان خوزستان) که در این زمان ارتفاع اولیه نیشکر در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و آبیاری جویچه‌ای به ترتیب ۱۳/۱ و ۱۳/۷ سانتی‌متر بود. نتایج اندازه‌گیری رشد در شکل ۲ نشان می‌دهد که در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی رشد گیاه بیشتر از روش آبیاری جویچه‌ای است که متاثر از شرایط رطوبتی مناسب‌تر جهت توسعه گیاه نیشکر در مقایسه با روش آبیاری جویچه‌ای است (متوسط رطوبت وزنی خاک در زمان آبیاری در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی برابر ۲۰/۱ درصد و در روش آبیاری جویچه‌ای برابر ۱۸/۸ درصد بود و همچنین روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی دارای یکنواختی بهتری بود). بنابراین وجود رطوبت مناسب در محدوده فعالیت ریشه گیاه و همچنین عدم نوسان زیاد در مقدار رطوبت خاک در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی (به دلیل ماهیت برنامه آبیاری در روش قطره‌ای زیرسطحی) می‌تواند در تامین آب مورد نیاز گیاه و همچنین تحرک بهتر عناصر غذایی مانند فسفر و پتاسیم به سمت ریشه گیاه و نیز فعالیت میکروارگانیسم‌ها در محدوده ریشه گیاه موثر باشد. مقایسه میانگین رشد در بازه زمانی مورد بررسی نشان می‌دهد که متوسط رشد نیشکر در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی حدود ۵۴ درصد بیشتر از روش آبیاری جویچه‌ای است. مقادیر ارتفاع نیشکر اندازه‌گیری شده در پایان این دوره در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و آبیاری جویچه‌ای به ترتیب برابر ۶۵/۳ و ۴۹/۲ سانتی‌متر بود که نشان‌دهنده تولید زیست‌توده بیشتر در گیاه نیشکر در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در دوره اندازه‌گیری می‌باشد.



شکل ۲. مقایسه روند رشد گیاه نیشکر در دو روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و روش جویچه‌ای

اجزاء فسفر در خاک

با توجه به متفاوت بودن فعالیت ریشه گیاه و مقدار تولید زیست‌توده بخش هوایی در دو روش آبیاری مورد بررسی، مقادیر جذب فسفر و بنابراین تغییر در اجزاء فسفر می‌تواند در این روش‌های آبیاری در خاک اتفاق بیافتد. نتایج مقایسه میانگین اجزاء مختلف شیمیایی فسفر در زمان‌های مختلف در جدول ۲ نیز نشان‌دهنده وجود اختلاف در برخی از اجزاء فسفر می‌باشد که در ادامه توضیحاتی مربوط به هر جزء ارائه خواهد شد.

جدول ۲. تجزیه واریانس میانگین مربعات زمان اندازه‌گیری، عمق نمونه‌برداری و روش آبیاری و اثرات متقابل آنها بر اجزاء شیمیایی فسفر معدنی

منبع تغییرات	Ca ₂ -P	Ca ₈ -P	Al-P	Fe-P	O-P	Ca ₁₀ -P	P-Olsen
زمان	۲/۱۶**	۱۱۹/۹۱**	۱/۷۴ ^{ns}	۸۱/۱۳**	۵۷/۹۳**	۱۳۱/۸۶**	۲۰/۱۵**
عمق	۰/۰۰۲ ^{ns}	۲۸/۵۲ ^{ns}	۰/۳۲ ^{ns}	۶/۳۸ ^{ns}	۳/۰ ^{ns}	۴۸/۰۰*	۲/۹۰*
روش آبیاری	۰/۹۴**	۶۳۸/۰۲**	۱۶/۴۵**	۳۴۹/۳۸**	۱۰/۰۸ ^{ns}	۵۷۴/۰۸**	۰/۴۸ ^{ns}
زمان × عمق	۰/۳۵**	۱۳/۷۴ ^{ns}	۱/۰۲ ^{ns}	۱۹/۰۵**	۶/۲۸ ^{ns}	۱۷/۱۱ ^{ns}	۱/۱۷ ^{ns}
زمان × روش آبیاری	۰/۲۴**	۴۰/۱۳*	۲/۸۱ ^{ns}	۶/۷۷ ^{ns}	۴۴/۵۸**	۵۲/۳۰**	۰/۲۱ ^{ns}
عمق × روش آبیاری	۰/۰۱ ^{ns}	۵۰/۰۲ ^{ns}	۰/۰۸ ^{ns}	۰/۱۳ ^{ns}	۱۲/۰۰ ^{ns}	۸/۳۳ ^{ns}	۰/۵۶ ^{ns}
زمان × عمق × روش آبیاری	۰/۲۳**	۸/۵۸ ^{ns}	۱/۰۷ ^{ns}	۴/۸۵ ^{ns}	۳/۷۲ ^{ns}	۸/۱۱ ^{ns}	۴/۶۳**
خطا	۰/۰۴	۱۲/۲۹	۰/۹۸	۳/۷۶	۵/۳۱	۷/۶۰	۰/۴۳

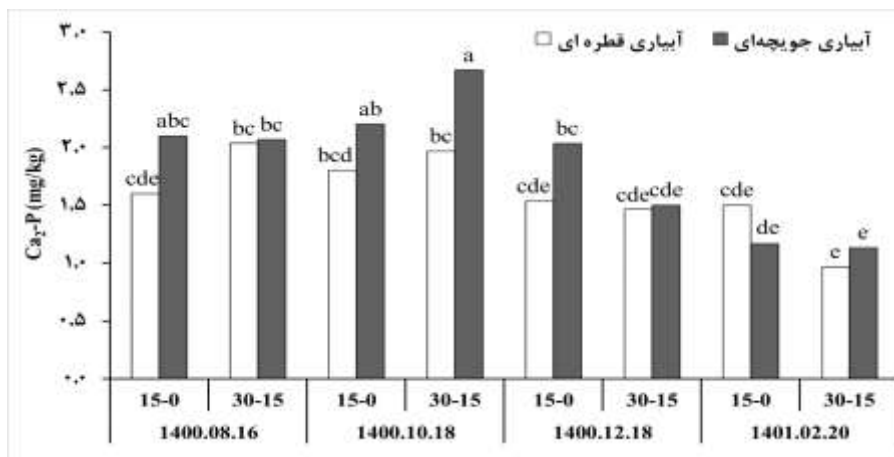
ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

دی‌کلسیم فسفات (Ca₂-P)

نتایج جدول تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان می‌دهد که زمان نمونه‌برداری و روش آبیاری تأثیر معنی‌داری ($P < 0.01$) در مقدار دی‌کلسیم فسفات خاک داشته‌اند در حالی که تأثیر عمق نمونه‌برداری خاک از نظر آماری معنی‌دار نبود و همچنین اثر متقابل این سه عامل معنی‌دار ($P < 0.01$) بود. بررسی اثرات اصلی زمان نمونه‌برداری نشان داد که بیشترین مقدار دی‌کلسیم فسفات با میانگین ۲/۱۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم در زمان T2 و کمترین مقدار با میانگین ۱/۱۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم در زمان T4 مشاهده گردید. بنابراین با توجه به این که دی‌کلسیم فسفات شکل شیمیایی به راحتی قابل جذب توسط گیاه می‌باشد، با رشد و توسعه گیاه و افزایش جذب فسفر از خاک، مقدار این شکل شیمیایی فسفر نیز در خاک اطراف ریشه کاهش می‌یابد. همچنین تغییر این شکل شیمیایی فسفر به اشکال با حلالیت کمتر نیز می‌تواند در تغییرات مقدار دی‌کلسیم فسفات با گذشت زمان موثر باشد. مقایسه اثرات اصلی روش آبیاری نشان داد که آبیاری جویچه‌ای دارای مقدار دی‌کلسیم فسفات بیشتری به‌صورت معنی‌دار ($P < 0.05$) در مقایسه با خاک در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بود که می‌تواند به‌عنوان شاخصی از جذب بیشتر فسفر توسط نیشکر از خاک در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی باشد (کریمی و همکاران، ۱۴۰۳).

نتایج بررسی شکل شیمیایی دی‌کلسیم فسفات در شکل ۳ نشان می‌دهد که در عمق ۱۵ سانتی‌متری از سطح خاک، اختلاف مقدار Ca₂-P در دو روش آبیاری در ابتدای دوره رشد زیاد بود و در انتهای دوره اندازه‌گیری تغییر کرد به‌طوری‌که در زمان T1، در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی مقدار Ca₂-P حدود ۲۴ درصد کمتر از روش آبیاری جویچه‌ای بود که می‌تواند نشان‌دهنده نیاز جذب بیشتر گیاه باشد در صورتی که در انتهای دوره اندازه‌گیری، مقدار دی‌کلسیم فسفات خاک در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی حدود ۲۹ درصد بیشتر از روش آبیاری جویچه‌ای بود. از دلایل این اختلاف با گذشت زمان در دو روش آبیاری می‌توان به نیاز بیشتر نیشکر به جذب فسفر به دلیل شرایط مناسب رشد بیشتر گیاه و همچنین سطحی بودن ریشه در ابتدای رشد و نفوذ عمقی ریشه با ادامه فصل رشد اشاره کرد.

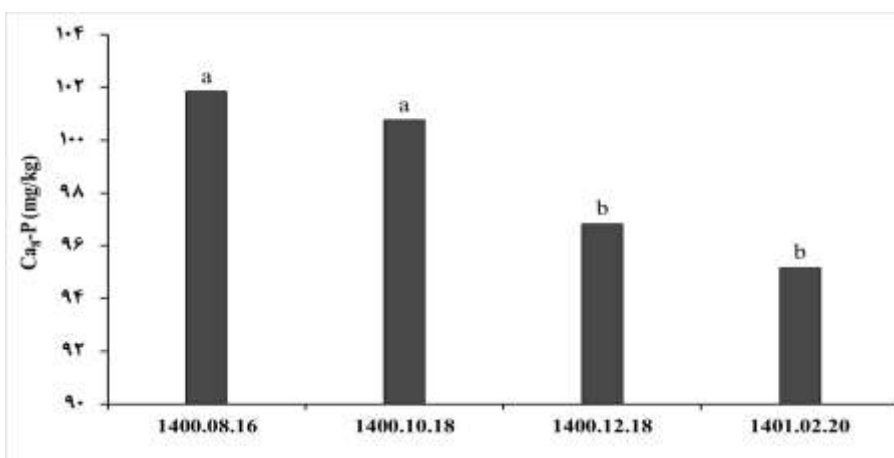
در عمق ۳۰-۱۵ سانتی‌متری نوسان اختلاف مقادیر Ca₂-P مشاهده می‌شود به‌طوری‌که از T1 تا T4 مقادیر این جزء از فسفر خاک در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی به ترتیب ۲، ۲۶ و ۱۵ درصد کمتر از روش آبیاری جویچه‌ای بود. بنابراین کمتر بودن جزء شیمیایی Ca₂-P به‌عنوان شکل قابل جذب فسفر برای گیاه در خاک در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در مقایسه با روش آبیاری جویچه‌ای می‌تواند با توجه به رشد بیشتر گیاه در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، نشان‌دهنده تأمین بیشتر فسفر برای گیاه نیشکر باشد. (Safirzadeh et al., 2021) در مطالعه اجزاء شیمیایی فسفر در ریزوسفر گیاه نیشکر نشان دادند که جذب فسفر در گیاه با افزایش شکل شیمیایی محلول افزایش یافت.



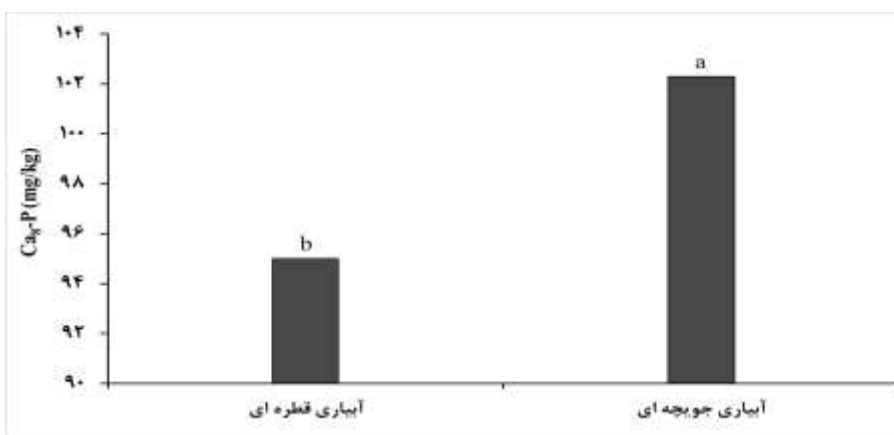
شکل ۳. اثر متقابل روش آبیاری، زمان و عمق نمونه‌برداری در مقدار Ca_2-P

اکتاکلسیم فسفات (Ca_8-P)

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان می‌دهد که اثر زمان نمونه‌برداری و روش آبیاری در مقدار اکتاکلسیم فسفات معنی‌دار ($P < 0.01$) بود در حالی که اثر عمق نمونه‌برداری و اثرات متقابل زمان نمونه‌برداری، روش آبیاری و عمق نمونه‌برداری از نظر آماری معنی‌دار نبود. مقایسه زمان‌های مختلف نمونه‌برداری به صورت اثرات اصلی در شکل ۴ نشان می‌دهد که بیشترین مقدار Ca_8-P در اولین زمان نمونه‌برداری (میانگین $101/83$ میلی گرم بر کیلوگرم) مشاهده شد و کمترین مقدار در زمان T4 (میانگین $95/17$ میلی گرم بر کیلوگرم) بود. مقایسه اثر روش‌های آبیاری بر مقدار Ca_8-P (شکل ۵) نشان می‌دهد که به طور کلی آبیاری جویچه‌ای دارای حدود ۸ درصد اکتاکلسیم فسفات بیشتر در مقایسه با روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بود.



شکل ۴. اثرات اصلی زمان نمونه‌برداری در مقدار Ca_8-P



شکل ۵. اثرات اصلی روش آبیاری در مقدار Ca_8-P

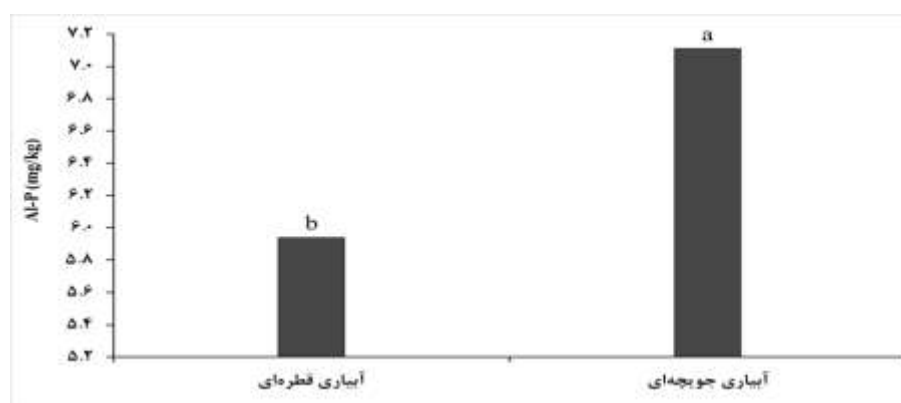
در عمق ۱۵-۰ سانتی‌متری، در ابتدا اختلاف بین دو روش آبیاری کمتر از انتهای زمان نمونه‌برداری بود به طوری که در زمان T1، مقدار Ca8-P در خاک با روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی ۴ درصد از خاک با روش آبیاری جویچه‌ای کمتر بود در حالی که این اختلاف در زمان T4 به ۱۲ درصد افزایش پیدا کرد. در عمق ۳۰-۱۵ سانتی‌متری تغییرات اختلاف در مقدار Ca8-P در دو روش آبیاری کمتر بود به طوری که در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی مقدار اکتاکلسیم فسفات در زمان‌های T1 و T4 به ترتیب ۲ و ۵ درصد کمتر از روش آبیاری جویچه‌ای بود. مقایسه تغییرات مقدار Ca8-P در روش‌های آبیاری نشان می‌دهد که در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، مقدار Ca8-P در زمان T4 به مقدار ۸ درصد کمتر از زمان T1 بود. در روش آبیاری جویچه‌ای کاهش مقدار Ca8-P از زمان T1 تا T4 برابر ۷ درصد بود.

تأمین رطوبت مناسب در خاک و قرار گرفتن در محدوده رطوبت ظرفیت زراعی در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی می‌تواند از دلایل استفاده بیشتر گیاه از منابع و اجزاء فسفر در خاک باشد (متوسط رطوبت وزنی خاک در زمان آبیاری در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی برابر ۲۰/۱ درصد و در روش آبیاری جویچه‌ای برابر ۱۸/۸ درصد بود و همچنین روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی دارای یکنواختی بهتری بود). بنابراین افزایش اختلاف شکل شیمیایی اکتاکلسیم فسفات در دو روش آبیاری با افزایش رشد گیاه می‌تواند شاخصی از استفاده بیشتر گیاه نیشکر از این شکل شیمیایی فسفر باشد. در مطالعه اجزاء شیمیایی فسفر در ریزوسفر نیشکر توسط (Safirzadeh et al., 2021) نشان داده شد که Ca8-P مهمترین جزء شیمیایی در ارتباط با Ca2-P و فراهمی فسفر برای نیشکر در طول زمان بود. (Shen et al., 2004) تحقیقی تغییرات اجزاء فسفر را با جذب فسفر در گیاه برنج بررسی کردند. نتایج نشان داد که اجزاء Ca2-P و Ca8-P همبستگی خوبی با فسفر السن و جذب فسفر گیاه نشان داد.

فسفات آلومینیوم (Al-P)

بررسی عوامل موثر بر تغییرات فسفات آلومینیوم در خاک در جدول تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان داد که فقط روش آبیاری تأثیر معنی‌داری ($P < 0.01$) بر مقدار Al-P در خاک اطراف ریشه نیشکر داشته است و اثرات زمان نمونه‌برداری، عمق نمونه‌برداری و اثرات متقابل آنها از نظر آماری معنی‌دار نبود. مقایسه میانگین دو روش آبیاری به صورت اثرات اصلی نشان داد که به طور کلی مقدار Al-P در خاک در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی ۱۶ درصد کمتر از روش آبیاری جویچه‌ای بود (شکل ۶).

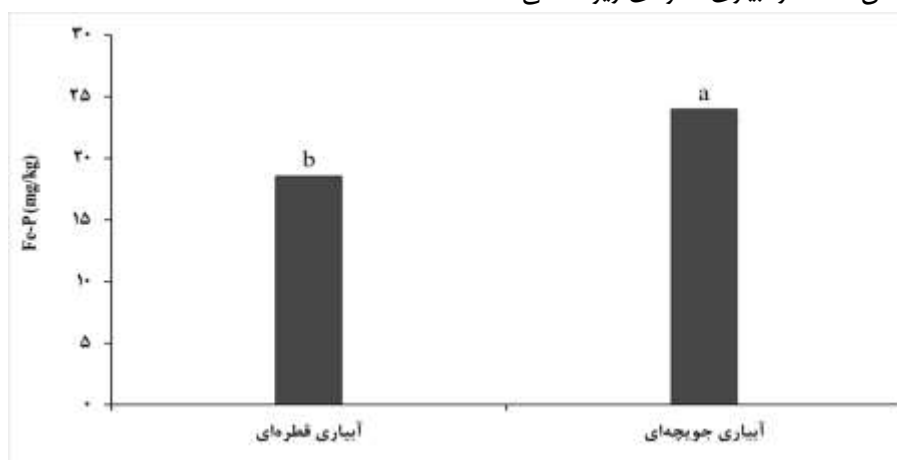
بررسی شکل شیمیایی فسفات آلومینیوم (Al-P) نشان می‌دهد که در زمان T4 در عمق ۱۵-۰ سانتی‌متری در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در مقایسه با زمان T1 به مقدار ۲۵ درصد کاهش می‌یابد در حالی که در عمق ۳۰-۱۵ سانتی‌متری کاهش مقدار فسفات آلومینیوم مشاهده نشد. در روش آبیاری جویچه‌ای، با افزایش سن گیاه مقدار فسفات آلومینیوم در خاک افزایش نشان داد به طوری که در زمان T4 در عمق‌های ۱۵-۰ و ۳۰-۱۵ سانتی‌متری به ترتیب ۲۶ و ۱۱ درصد نسبت به زمان T1 افزایش نشان داد. در عمق ۱۵-۰ سانتی‌متری، در زمان T1 فسفات آلومینیوم در خاک در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بیشتر از روش جویچه‌ای بود در حالی که در زمان T4، خاک در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی دارای ۳۳ درصد Al-P کمتری از خاک در آبیاری جویچه‌ای بود. روند کاهش فسفات آلومینیوم نیز با افزایش سن نیشکر در خاک با آبیاری قطره‌ای زیرسطحی مشاهده گردید. در عمق ۳۰-۱۵ سانتی‌متری، اختلاف بین دو روش آبیاری دارای نوسان کمتری بود به طوری که در زمان‌های T1 و T4 در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، خاک به ترتیب دارای ۱۲ و ۱۹ درصد فسفات آلومینیوم کمتری در مقایسه با آبیاری جویچه‌ای بود.



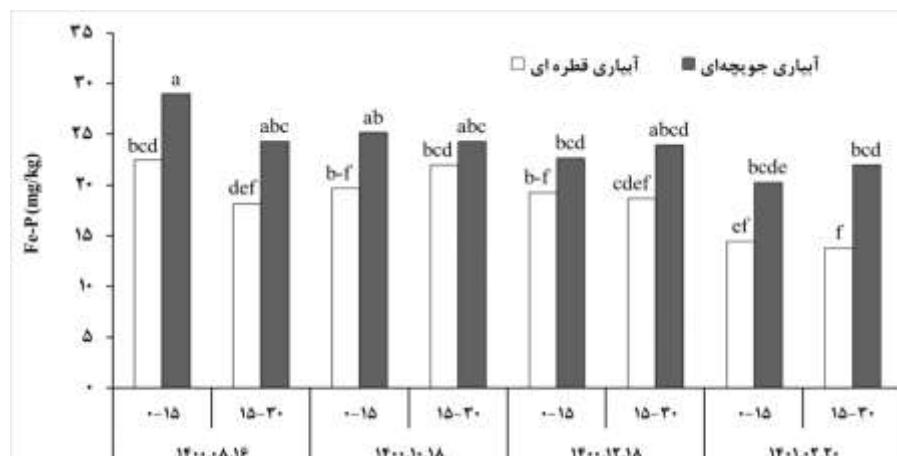
شکل ۶. اثرات اصلی روش آبیاری در مقدار Al-P

فسفات آهن (Fe-P)

بررسی میزان تاثیر عوامل مورد بررسی در جزء شیمیایی فسفات آهن در جدول ۲ نشان می‌دهد که تأثیر زمان نمونه‌برداری و روش آبیاری در تغییرات Fe-P از لحاظ آماری معنی‌دار ($P < 0.01$) بود در حالی که عمق نمونه‌برداری و همچنین اثر متقابل هر سه عامل مورد مطالعه در مقادیر Fe-P از نظر آماری معنی‌دار نبود. مقایسه میانگین بین زمان‌های نمونه‌برداری نشان می‌دهد که بیشترین مقدار فسفات آهن در زمان T1 (با میانگین ۲۳/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و کمترین مقدار فسفات آهن در زمان نمونه‌برداری T4 (با میانگین ۱۷/۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم) مشاهده شد در حالی که مقادیر فسفات آهن در زمان‌های T2 و T3 اختلاف معنی‌داری نشان ندادند. بنابراین اندازه‌گیری شکل شیمیایی فسفات آهن (Fe-P) نشان‌دهنده روند کاهشی این جزء از فسفر با گذشت زمان می‌باشد (شکل ۸). مقایسه میانگین اثرات اصلی روش آبیاری نشان داد (شکل ۷) مقدار فسفات آهن در خاک ناحیه ریشه در استفاده از روش آبیاری جویچه‌ای به طور معنی‌داری ($P < 0.05$) بیشتر از روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی است (در آبیاری جویچه‌ای ۲۹ درصد بیشتر از آبیاری قطره‌ای زیرسطحی است). در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، در عمق ۱۵-۰ سانتی‌متری با گذشت زمان از T1 تا T4 مقدار فسفات آهن ۳۶ درصد کاهش نشان داد در حالی که در عمق ۱۵-۳۰ سانتی‌متری مقدار کاهش ۲۴ درصد بود. در روش آبیاری جویچه‌ای، مقدار کاهش شکل شیمیایی فسفات آهن در عمق‌های ۱۵-۰ و ۱۵-۳۰ سانتی‌متری با گذشت زمان به ترتیب برابر ۳۰ و ۱۰ درصد بود. بنابراین تغییرات فسفات آهن در عمق ۱۵-۳۰ سانتی‌متری خاک در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بیشتر بود. در مقایسه مقدار Fe-P در عمق ۱۵-۰ سانتی‌متری در دو روش آبیاری، نتایج نشان داد که در زمان T1 نمونه خاک روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی دارای اختلاف معنی‌دار ($P < 0.05$) و ۲۲ درصد فسفات آهن کمتری در مقایسه با روش آبیاری جویچه‌ای بود و تا زمان T3 این اختلاف روند کاهشی را نشان داد و پس از آن اختلاف این دو روش آبیاری در مقدار فسفات آهن تا ۲۹ درصد افزایش یافت (شکل ۸). تغییرات مقدار Fe-P در عمق ۱۵-۳۰ سانتی‌متر روند مشابه با عمق ۱۵-۰ را نشان داد با این تفاوت در زمان T4 اختلاف دو روش آبیاری به ۳۷ درصد رسید که نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار ($P < 0.05$) و نرخ کاهش بیشتر فسفات آهن در خاک در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی است.



شکل ۷. اثرات اصلی روش آبیاری در مقدار Fe-P



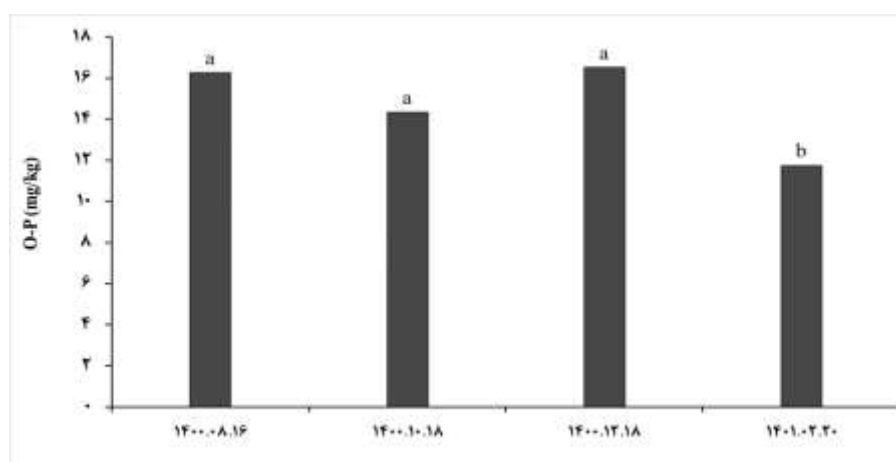
شکل ۸. اثر متقابل روش آبیاری، زمان و عمق نمونه‌برداری در مقدار Fe-P

فسفات محبوس شده (O-P)

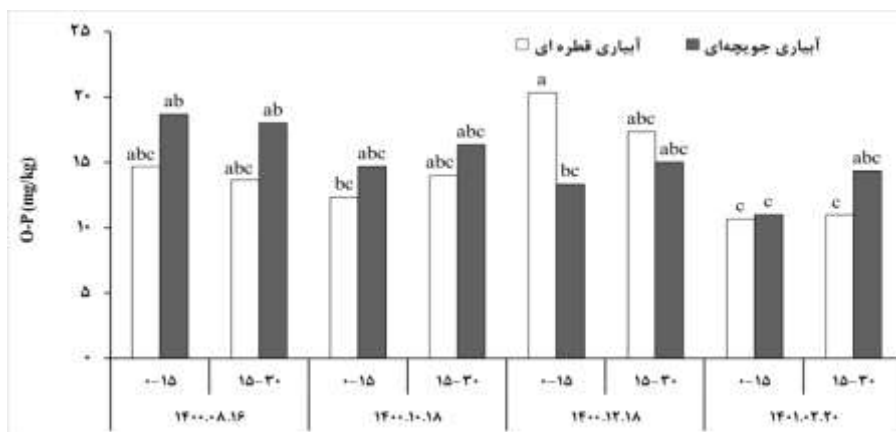
در بررسی شکل شیمیایی فسفر محبوس شده و عوامل مورد بررسی موثر بر آن، مطابق نتایج جدول تجزیه واریانس (جدول ۲) فقط زمان نمونه‌برداری دارای تأثیر معنی‌دار ($P < 0.01$) بر مقدار فسفر محبوس شده در خاک بود و عوامل عمق نمونه‌برداری و روش آبیاری تأثیر معنی‌داری بر این شکل شیمیایی فسفر در خاک نشان ندادند. مقایسه میانگین زمان نمونه‌برداری نشان داد که بین زمان‌های T1، T2 و T3 اختلاف معنی‌دار آماری وجود نداشت در حالی که مقدار فسفر محبوس اندازه‌گیری شده در زمان T4 (با میانگین ۱۱/۷۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) به طور معنی‌داری ($P < 0.05$) از زمان‌های دیگر نمونه‌برداری کمتر بود (شکل ۹).

شکل شیمیایی فسفر محبوس شده (O-P) نشان‌دهنده فسفر موجود در ترکیبات اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن و آلومینیوم می‌باشد و به راحتی برای گیاه قابل جذب نیست. در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، مقدار شکل شیمیایی O-P خاک در عمق ۱۵-۰ سانتی‌متری در زمان T4 به مقدار ۲۷ درصد کمتر از زمان T1 بود که نشان‌دهنده کاهش این شکل فسفر با گذشت زمان و توسعه گیاه می‌باشد. در حالی که این تغییرات در عمق ۳۰-۱۵ سانتی‌متری برابر ۲۰ درصد بود (شکل ۱۰).

در روش آبیاری سطحی، کاهش شکل شیمیایی O-P با گذشت زمان در عمق ۱۵-۰ سانتی‌متری برابر ۴۱ درصد بود که با توجه به مقدار بیشتر اولیه در مقایسه با روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، کاهش قابل توجهی را نشان داد. در عمق ۳۰-۱۵ سانتی‌متری خاک، مقدار کاهش با گذشت زمان برابر ۲۰ درصد بود. بنابراین شکل شیمیایی فسفر محبوس شده بیشتر در قسمت سطحی خاک دارای نوسانات زیادی در مقایسه با عمق پایین تر خاک بود. مقایسه دو روش آبیاری از نظر مقدار شکل شیمیایی فسفر محبوس شده نشان می‌دهد که زمان T1 در عمق ۱۵-۰ سانتی‌متری، خاک با آبیاری قطره‌ای زیرسطحی دارای ۲۱ درصد O-P کمتری در مقایسه با آبیاری جویچه‌ای بود. در صورتی که با گذشت زمان این اختلاف کاهش یافت. نتایج اندازه‌گیری در عمق ۳۰-۱۵ سانتی‌متری نشان داد که از زمان T1 تا T3 اختلاف بین دو روش آبیاری کاهش یافت ولی در زمان T4 این اختلاف افزایش یافت و به ۲۳ درصد رسید.



شکل ۹. اثرات اصلی زمان نمونه‌برداری در مقدار O-P

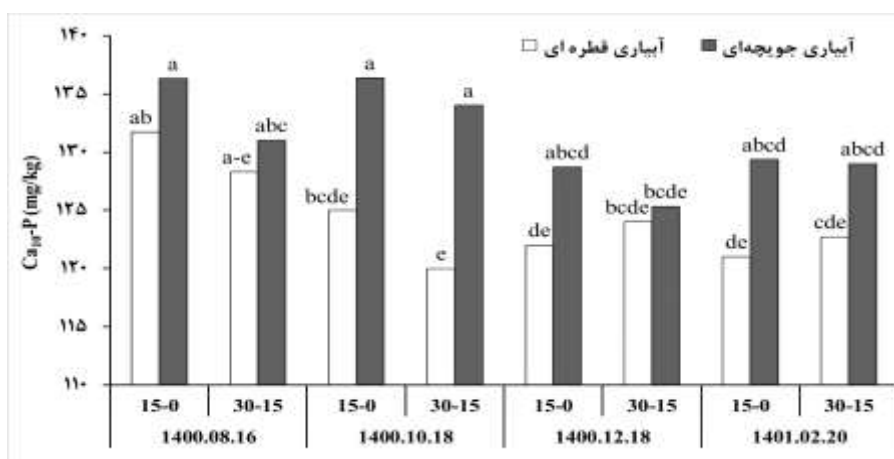


شکل ۱۰. اثر متقابل روش آبیاری، زمان و عمق نمونه‌برداری در مقدار O-P

آپاتیت (Ca₁₀-P)

نتایج جدول تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان می‌دهد که از عوامل مورد بررسی در مقدار شکل شیمیایی Ca₁₀-P در خاک، زمان نمونه‌برداری و روش آبیاری در سطح ۱ درصد ($P < 0.01$) و عمق نمونه‌برداری در سطح ۵ درصد ($P < 0.05$) تأثیر معنی‌داری بر مقدار این شکل از فسفر در خاک دارند در حالی که اثر متقابل این سه عامل با یکدیگر از نظر آماری معنی‌دار نبود. مقایسه میانگین زمان نمونه‌برداری نشان می‌دهد که بیشترین مقدار Ca₁₀-P در زمان T1 (با میانگین ۱۳۱/۸ میلی گرم بر کیلوگرم) و کمترین مقدار با اختلاف معنی‌دار ($P < 0.05$) از اولین زمان نمونه‌برداری در زمان T3 (با میانگین ۱۲۵ میلی گرم بر کیلوگرم) مشاهده گردید. مقایسه میانگین عمق نمونه‌برداری نشان داد که مقدار Ca₁₀-P در عمق ۰-۱۵ سانتی‌متری به طور معنی‌داری ($P < 0.05$) بیشتر از عمق ۱۵-۳۰ سانتی‌متری بود. بررسی اثرات اصلی روش آبیاری نشان داد که خاک محیط ریشه در روش آبیاری جویچه‌ای (با میانگین ۱۳۱/۳ میلی گرم بر کیلوگرم) به طور معنی‌داری ($P < 0.05$) دارای Ca₁₀-P بیشتری در مقایسه با آبیاری قطره‌ای زیرسطحی (با میانگین ۱۲۴/۳ میلی گرم بر کیلوگرم) بود.

شکل شیمیایی آپاتیت (Ca₁₀-P) به عنوان ساختار پایدار فسفات کلسیم در خاک‌های آهکی مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج اندازه‌گیری این شکل شیمیایی در شکل ۱۱ نشان می‌دهد که در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در عمق ۰-۱۵ سانتی‌متری کاهش مقدار آپاتیت از زمان T1 تا T4 فقط ۸ درصد بود و همچنین مقدار کاهش با گذشت زمان در عمق ۱۵-۳۰ سانتی‌متری در خاک برابر ۴ درصد بود. بررسی تغییرات این شکل شیمیایی پایدار فسفر در روش آبیاری جویچه‌ای نشان داد که در عمق‌های ۰-۱۵ و ۱۵-۳۰ سانتی‌متری، کاهش مقدار Ca₁₀-P به ترتیب برابر ۵ و ۲ درصد بود. بنابراین نتایج نشان می‌دهد که در هر روش آبیاری تغییرات این شکل شیمیایی فسفر در مقایسه با سایر اجزاء شیمیایی فسفر با گذشت زمان ناچیز است. در مقایسه تأثیر دو روش آبیاری بر تغییرات Ca₁₀-P در خاک نتایج نشان می‌دهد که در عمق ۰-۱۵ سانتی‌متری تغییرات این جزء شیمیایی در دو روش آبیاری با گذشت زمان اندک است به طوری که در زمان T1 مقدار Ca₁₀-P در خاک برای آبیاری قطره‌ای زیرسطحی ۳ درصد کمتر از آبیاری جویچه‌ای است و این اختلاف در زمان T4 به ۶ درصد کمتر در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی می‌رسد. روند مشابهی نیز در اختلاف مقدار Ca₁₀-P بین دو روش آبیاری در عمق ۱۵-۳۰ سانتی‌متری با گذشت زمان مشاهده گردید (۲ تا ۵ درصد مقدار کمتر در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با گذشت زمان). بنابراین شکل شیمیایی Ca₁₀-P با توجه به پایداری ساختاری، کمتر از سایر شکل‌های شیمیایی معدنی فسفر تحت تأثیر روش آبیاری و جذب گیاه قرار می‌گیرد. (Jalali & Ranjbar, 2010) در مطالعه اجزاء شیمیایی فسفر در ۲۰ نمونه خاک آهکی نشان دادند که فسفر عمدتاً به صورت ترکیب با کلسیم وجود دارد.

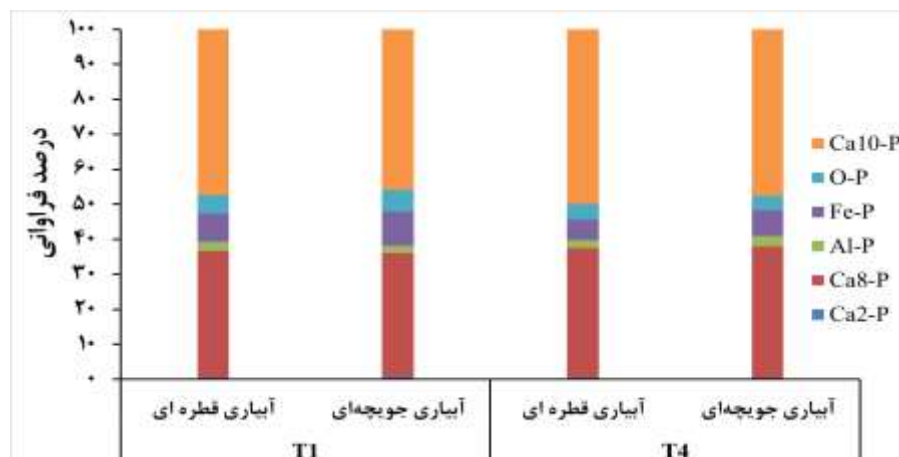


شکل ۱۱. اثر متقابل روش آبیاری، زمان و عمق نمونه‌برداری در مقدار Ca₁₀-P

درصد فراوانی اجزاء شیمیایی فسفر

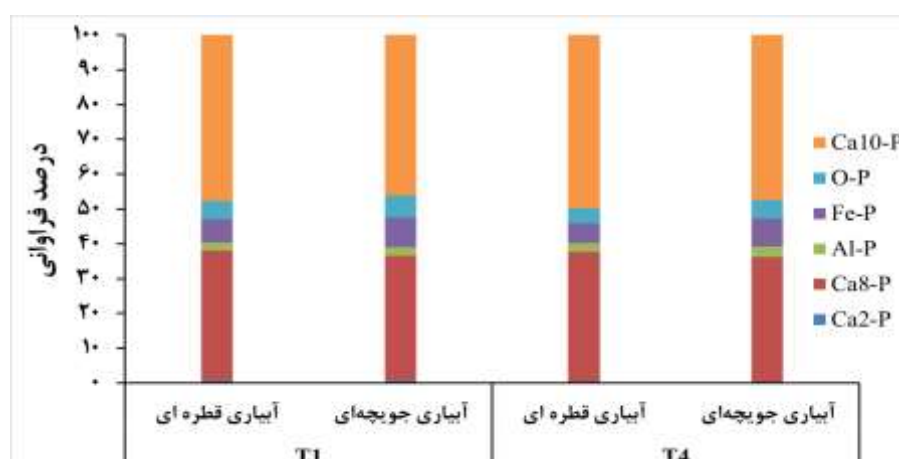
مطابق شکل ۱۲، در هر دو روش آبیاری، جزء شیمیایی و قابل جذب دی کلسیم فسفات (Ca₂-P) کمتر از یک درصد اجزاء فسفر را تشکیل می‌دهد در حالی که بیشترین درصد فراوانی مربوط به جزء Ca₁₀-P می‌باشد که پس از آن اکتاکلسیم فسفات (Ca₈-P) قرار دارد. بنابراین علیرغم اینکه روش آبیاری در مقادیر برخی از اجزاء شیمیایی تأثیرگذار بود اما در درصد این اجزاء و به‌ویژه در شکل‌های شیمیایی پایدار فسفات کلسیم تفاوتی ایجاد نکرد که دلیل اصلی آن مقادیر بسیار زیاد این اجزاء فسفر می‌باشد. در هر دو روش آبیاری با گذشت زمان از T1 تا T4، درصد فراوانی Ca₁₀-P تغییر زیادی را نشان نداد به طوری که در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی از ۴۷/۴ درصد به ۴۹/۹ درصد و در آبیاری جویچه‌ای از ۴۵/۸ درصد به ۴۷/۶ درصد افزایش یافته بود. در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی درصدهای اجزاء شیمیایی Al-P،

Fe-P و O-P در زمان T1 به ترتیب برابر ۲/۶، ۸/۱ و ۵/۳ درصد بود در حالی که در زمان T4 تا مقادیر به ترتیب ۲/۳، ۶/۰ و ۴/۴ درصد کاهش یافته بودند. در روش آبیاری جویچه‌ای فقط اجزاء Fe-P و O-P روند کاهشی را نشان دادند به طوری که در زمان T1 به ترتیب معادل ۹/۷ و ۶/۳ درصد بودند در حالی که در زمان T4 به ترتیب دارای فراوانی ۷/۵ و ۴/۰ درصد بودند.



شکل ۱۲. توزیع درصد فراوانی اجزاء شیمیایی فسفر در خاک در هر دو روش آبیاری در عمق ۱۵-۰ سانتی متری

نتایج توزیع درصد اجزاء فسفر در هر دو روش آبیاری در عمق ۱۵-۳۰ سانتی متری دارای روند مشابه عمق ۱۵-۰ سانتی متری می‌باشد (شکل ۱۳). ترتیب اجزاء شیمیایی فسفر در هر دو روش آبیاری از بیشترین تا کمترین به صورت $Ca_{10}-P > Ca_8-P > Fe-P > O-P > Al-P > Ca_2-P$ می‌باشد. محققین دیگر ترتیب فراوانی مقادیر اجزاء شیمیایی فسفر غیرآلی را به صورت $Ca_{10}-P > Ca_8-P > Fe-P > Al-P > O-P > Ca_2-P$ گزارش کردند (Jun et al., 2010). بنابراین نتایج نشان می‌دهد که ترکیبات پایدار فسفات کلسیم دارای بیشترین فراوانی در خاک می‌باشند. اجزایی از فسفر که با گذشت زمان از T1 تا T4 روند کاهشی را نشان دادند شامل Fe-P، O-P و Ca_2-P بودند در حالی که $Ca_{10}-P$ با گذشت زمان افزایش را نشان داد. بنابراین جزء شیمیایی فسفر پیوند شده با کلسیم منبع اصلی فسفر در این دو مزرعه می‌باشد. (Zhang et al., 2014) نیز در مطالعه جزء بندی فسفر در مقایسه اراضی کشاورزی و غیرکشاورزی بیان کردند که فسفر در ارتباط با کلسیم دارای بیشترین فراوانی در مقایسه با سایر اجزاء شیمیایی فسفر است.

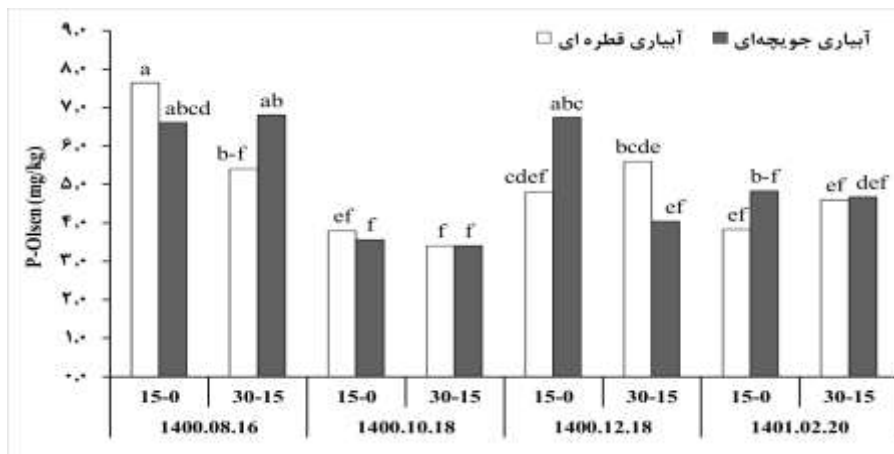


شکل ۱۳. توزیع درصد فراوانی اجزاء شیمیایی فسفر در خاک در هر دو روش آبیاری در عمق ۳۰-۱۵ سانتی متری

فسفر قابل استفاده (P-Olsen)

تجزیه و تحلیل آماری فسفر قابل استفاده در جدول تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان می‌دهد که زمان نمونه‌برداری ($P < 0.01$) و عمق نمونه‌برداری ($P < 0.05$) تأثیر معنی‌داری در مقدار فسفر قابل استفاده داشته‌اند در حالی که روش آبیاری تأثیر معنی‌داری در مقدار فسفر قابل استفاده نشان نداد و اثر متقابل این سه عامل دارای اثر معنی‌دار ($P < 0.01$) در مقدار فسفر خاک بود. مقایسه میانگین اثر اصلی زمان

نمونه‌برداری نشان داد که ترتیب مقدار فسفر قابل استفاده به صورت T1، T3، T4 و T2 به ترتیب با مقادیر ۴/۵، ۵/۲، ۶/۶ و ۳/۵ میلی گرم بر کیلوگرم دارای اختلاف معنی‌دار ($P < 0.05$) بودند. همچنین مقایسه میانگین‌های مقادیر فسفر قابل استفاده در عمق ۱۵-۰ سانتی متری (با میانگین ۵/۲ میلی گرم بر کیلوگرم) دارای اختلاف معنی‌دار ($P < 0.05$) با عمق ۳۰-۱۵ (با میانگین ۴/۷ میلی گرم بر کیلوگرم) بود.



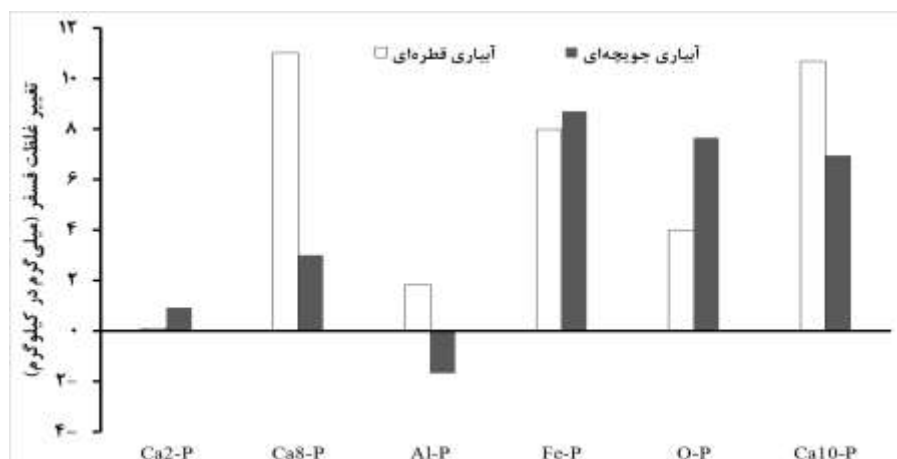
شکل ۱۴. اثر متقابل روش آبیاری، زمان و عمق نمونه‌برداری در مقدار فسفر قابل استفاده خاک

بررسی اثر متقابل تیمارها در شکل ۱۴ نشان می‌دهد که در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در عمق ۱۵-۰ سانتی متری مقدار فسفر قابل استفاده از زمان T1 تا T4 به طور معنی‌داری ($P < 0.05$) (به مقدار ۵۰ درصد کاهش) کاهش نشان داد. این در حالی است که در این عمق در روش آبیاری جویچه‌ای اختلاف بین (۲۷ درصد کاهش) اولین و آخرین زمان نمونه‌برداری معنی‌دار نبود. نتایج نمونه‌برداری خاک در عمق ۳۰-۱۵ سانتی متری نشان داد در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی اختلاف معنی‌دار آماری با گذشت زمان در مقدار فسفر قابل استفاده در خاک مشاهده نشد (۱۵ درصد کاهش از زمان T1 تا T4) در حالی که این اختلاف در آبیاری جویچه‌ای (۳۱ درصد کاهش از زمان T1 تا T4) معنی‌دار ($P < 0.05$) بود. به طور کلی بدون در نظر گرفتن تجزیه و تحلیل آماری، در هر دو روش آبیاری مورد استفاده روند کاهش مقدار فسفر قابل استفاده با گذشت زمان قابل مشاهده بود (شکل ۱۴).

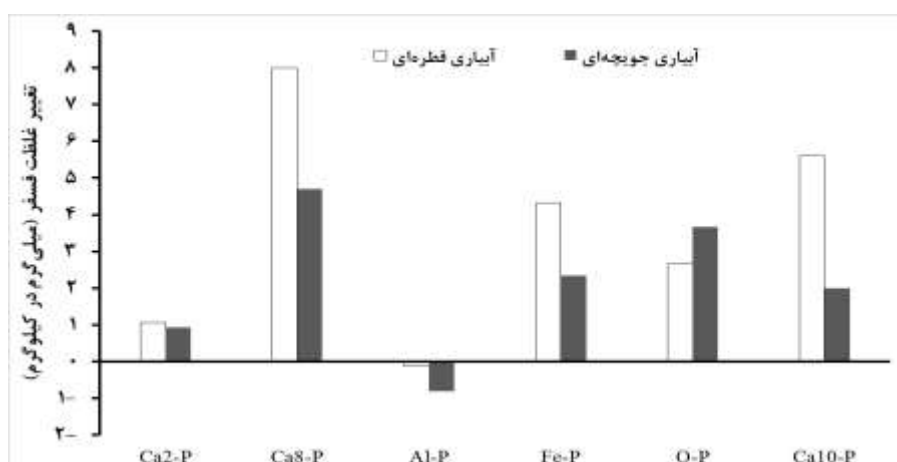
آگاهی و دانش اجزاء فسفر در خاک به منظور بررسی قابلیت دسترسی فسفر خاک مهم است. جزءبندی فسفر یک روش موثر برای بررسی قابلیت دسترسی فسفر غیرآلی خاک و تبدیل اجزاء فسفر به یکدیگر از منابع مختلف فسفر و فسفر السن به عنوان معیاری از قابلیت دسترسی فسفر خاک است (Shen et al., 2004). نتایج آنالیز آماری نشان داد که روش آبیاری یک عامل موثر در اجزاء شیمیایی فسفر در خاک محیط ریشه گیاه نیشکر بود به گونه‌ای که اشکال مختلف شیمیایی فسفر غیرآلی در خاک در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی کمتر از روش آبیاری جویچه‌ای بود. با توجه به شرایط پیچیده در محیط ریشه ناشی از آبیاری، حضور گیاه و فعالیت ریشه گیاه، جذب فسفر توسط گیاه، فعالیت میکروارگانیسم‌ها و اثرات آنها بر تغییر و تحولات فسفر در خاک و متفاوت بودن سینتیک تبدیل شکل‌های مختلف فسفر به یکدیگر، این کاهش شکل‌های شیمیایی فسفر غیرآلی در خاک محیط ریشه می‌تواند منجر به تامین مناسب فسفر برای گیاه و در نتیجه جذب بیشتر فسفر توسط نیشکر گردد. کریمی و همکاران (۱۴۰۳) در تحقیقی نشان دادند که استفاده از آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در زراعت نیشکر منجر به افزایش ۱۴/۸ درصدی جذب فسفر در مقایسه با روش آبیاری جویچه‌ای گردید.

تغییر غلظت شکل‌های شیمیایی فسفر غیرآلی در زمان T4 نسبت به زمان T1 در عمق ۱۵-۰ سانتی متر در شکل ۱۵ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد بیشترین تغییر در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی مربوط به ترکیبات فسفات کلسیم Ca₈-P و Ca₁₀-P و سپس Fe-P می‌باشد. این در حالی است که در آبیاری جویچه‌ای شکل‌های شیمیایی Fe-P، O-P و Ca₁₀-P به ترتیب دارای بیشترین تغییرات بودند. بررسی تغییرات شکل‌های شیمیایی فسفر در عمق ۳۰-۱۵ سانتی متر (شکل ۱۶) نشان می‌دهد که در خاک محیط ریشه در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی مشابه عمق ۱۵-۰ سانتی متر بیشترین تغییرات مربوط به شکل‌های شیمیایی Ca₈-P و Ca₁₀-P و سپس Fe-P بود در حالی که در روش آبیاری جویچه‌ای بیشترین تغییرات به شکل‌های شیمیایی Ca₈-P، O-P و Fe-P تعلق داشت. بنابراین روش آبیاری به دلیل اثرات مستقیم مانند مقدار رطوبت ناحیه ریشه و توالی تامین رطوبت و اثرات غیرمستقیم از قبیل تهویه، تراکم ریشه گیاه، تحرک عناصر غذایی و فعالیت میکروارگانیسم‌ها می‌تواند بر تغییرات اجزاء فسفر در خاک موثر باشد به گونه‌ای که اجزاء متفاوت فسفر در روش‌های آبیاری

مختلف می‌تواند در تأمین فسفر مورد نیاز گیاه موثر باشد. مقایسه دو روش آبیاری مورد بررسی نشان داد که مقدار مصرف آب در آبیاری جویچه‌ای برابر ۶۲۰۰۲۶ مترمکعب در بازه زمانی مورد مطالعه بود در حالی که مقدار مصرف آب در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی برابر ۲۵۹۹۴۰ مترمکعب بود که این تفاوت در مدیریت مصرف آب می‌تواند منجر به تفاوت‌های ذکر شده در بالا شود. به طور کلی نتایج نشان داد که در خاک محیط ریشه نیشکر در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی اجزاء شیمیایی فسفات کلسیم به‌عنوان منابع اصلی تأمین‌کننده فسفر بودند در حالی که در آبیاری جویچه‌ای اجزاء شیمیایی فسفات آهن و فسفر محبوس شده و سپس فسفات کلسیم به‌عنوان منابع تأمین‌کننده فسفر برای گیاه بودند.



شکل ۱۵. تغییر مقدار شکل‌های مختلف شیمیایی فسفر غیرآلی در آخرین زمان نمونه‌برداری در مقایسه با زمان اول در عمق ۱۵-۰ سانتی‌متر



شکل ۱۶. تغییر مقدار شکل‌های مختلف شیمیایی فسفر غیرآلی در آخرین زمان نمونه‌برداری در مقایسه با زمان اول در عمق ۱۵-۳۰ سانتی‌متر

نتیجه‌گیری

علاوه بر مطالعات زیادی که در زمینه رطوبت خاک و شوری در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی انجام شده است، از دیدگاه تغذیه گیاه و رفتار فسفر در خاک، بر اساس نتایج به دست آمده در این تحقیق، روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در تغییرات تعداد بیشتر اجزاء شیمیایی فسفر در خاک ناحیه ریشه گیاه اثر معنی‌داری ($P < 0.05$) را نشان داد که می‌تواند منتج به فراهمی بیشتر فسفر برای گیاه نیشکر با استفاده از این سیستم آبیاری گردد. در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی کاهش جزء شیمیایی Ca_8-P (به عنوان جزء نسبتاً قابل استفاده برای گیاه) با گذشت زمان، بیشتر از روش آبیاری جویچه‌ای بود که می‌تواند نشان‌دهنده تفاوت تأمین مقدار فسفر مورد نیاز گیاه (با تقریباً ثابت نگهداشتن شکل قابل دسترس Ca_2-P با گذشت زمان در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی) در دو روش آبیاری مورد بررسی باشد. همچنین از سایر اجزاء شیمیایی فسفر، ترکیبات شیمیایی $Ca_{10}-P$ و $Fe-P$ نیز در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی کاهش بیشتری در مقایسه با روش آبیاری جویچه‌ای نشان داد که این اجزاء نیز می‌توانند به عنوان منابع تأمین‌کننده فسفر در نظر گرفته شوند. اجزاء شیمیایی با پایداری بیشتر مانند



O-P به مقدار جزئی با گذشت زمان در دو روش آبیاری متفاوت بودند و در واقع تحت تأثیر نوع آبیاری قرار نگرفتند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که فقط اجزاء شیمیایی نسبتاً قابل استفاده برای گیاه تحت تأثیر روش آبیاری قرار گرفتند. بنابراین با توجه به شرایط رطوبتی مناسب در خاک ناحیه ریشه گیاه در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و حفظ یکنواختی شرایط رطوبتی در مقایسه با روش آبیاری جویچه‌ای، اجزاء شیمیایی فسفر و رفتار شیمیایی فسفر در خاک تحت تأثیر قرار می‌گیرد که با توجه به نوع تغییرات می‌تواند در شرایط آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در مقایسه با روش جویچه‌ای مقدار فسفر بیشتری در اختیار گیاه قرار گیرد. به منظور بررسی‌های دقیق‌تر، بررسی شیمی محلول فسفر در خاک ناحیه ریشه، کارایی جذب فسفر ارقام مختلف نیشکر و همچنین اثرات فعالیت میکروارگانیسم‌ها در تغییرات شیمیایی فسفر در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی پیشنهاد می‌گردد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

- زنگنه یوسف‌آبادی، الهام (۱۳۹۷). مطالعه دینامیک رطوبت و شوری تحت مدیریت آبیاری قطره‌ای زیرسطحی گیاه نیشکر در جنوب اهواز. پایان نامه دکترای آبیاری و زهکشی. گروه علوم مهندسی آب. دانشگاه شهید چمران. اهواز.
- شینی‌دشتگل، علی (۱۳۹۹). اثر فواصل و اعماق مختلف کارگذاری قطره‌چکانهای تنظیم‌کننده فشار در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بر روی توزیع رطوبت، بهره‌وری آب و عملکرد کمی و کیفی نیشکر در شرایط اقلیمی جنوب خوزستان. پایان نامه دکترای آبیاری و زهکشی. گروه علوم مهندسی آب. دانشگاه شهید چمران. اهواز.
- شینی‌دشتگل، علی؛ برومندنسب، سعید؛ ناصری، عبدعلی (۱۳۹۹). اثر آبیاری قطره‌ای زیرسطحی روی دینامیک شوری، میزان بهره‌وری آب و عملکرد نیشکر بازروی. نشریه آب و خاک، ۳۴(۴)، ۷۹۷-۸۱۱.
- شینی‌دشتگل، علی؛ حمودی، مجید؛ زنگنه یوسف‌آبادی، الهام؛ زارعی، شعبان (۱۴۰۳). بررسی کارایی و دوام سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در اراضی نیشکر جنوب اهواز. پنجمین همایش ملی مدیریت آب در مزرعه.
- کریمی، اکبر؛ زنگنه یوسف‌آبادی، الهام؛ صفیرزاده، سعید (۱۴۰۳). مقایسه فراهمی و جذب فسفر و پتاسیم در نیشکر در شرایط آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و آبیاری جویچه‌ای. علوم و مهندسی آبیاری، ۴۷(۳)، ۵۷-۶۷.

REFERENCES

- Abou Seeda, M. A., Hammad, S. A., Yassen, A. A., & Abou El-Nour, E. A. (2020). Evaluation and Optimization of Subsurface Irrigation (SDI) System: A review. *Middle East Journal of Applied Sciences*, 10(3), 508-534.
- Adhami, E., Ronaghi, A., Karimian, N., & Molavi, R. (2012). Transformation of phosphorus in highly calcareous soils under field capacity and waterlogged conditions. *Soil Research*, 50, 249-255.
- Bibi, S., Irshad, M., Mohiuddin, M., Sher, S., Tariq, M. A. U. R., & Ng, A. W. M. (2022). Distribution of Phosphorus Fractions in Orchard Soils in Relation to Soil Properties and Foliar P Contents. *Sustainability*, 14, 3966. <https://doi.org/10.3390/su14073966>
- Bouyoucos, G. J. (1961). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agronomy Journal*, 54, 464-465.
- Dharumarajan, S., & Singh, S. K. (2014). Variation of soil properties and phosphorus fractions in three cropping systems of lower indo-Gangetic alluvial plain. *African Journal of Agricultural Research*, 9(24), 1878-1886.
- El-Nesr, M. N., Alazba, A. A., & Simunek, J. (2014). HYDRUS simulations of the effects of dual-drip subsurface irrigation and a physical barrier on water movement and solute transport in soils. *Irrigation Science*, 32, 111-125.
- Gonçalves, I. Z., Barbosa, E. A. A., Santos, L. N. S., Nazario, A. A., Feitosa, D. R. C., Tuta, N. F., & Matsura, E. E. (2019). Nutritional balance and production of sugarcane irrigated with treated wastewater through subsurface drip. *Irrigation Science*, 37(2), 207-217.
- Jalali, M., & Ranjbar, F. (2010). Aging effects on phosphorus transformation rate and fractionation in some calcareous soils. *Geoderma*, 155, 101-106.
- Jiang, B., & Gu, Y. (1989). A suggested fractionation scheme of inorganic phosphorus in calcareous soils. *Fertilizer Research*, 20, 159-165.
- Jun, W., Wen-Zhao, L., Han-Feng, M., & Ting-Hui, D. (2010). Inorganic phosphorus fractions and phosphorus availability in a calcareous soil receiving 21-year superphosphate application. *Pedosphere*, 20(3), 304-

310.

- Karimi, A., Zanganeh-Yusefabadi, E., & Safirzadeh, S. (2024). Comparison of availability and uptake of phosphorus and potassium in sugarcane under subsurface drip irrigation and furrow irrigation. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering*, 47(3), 57-67. (In Persian)
- Knudsen, D., Peterson, G. A., & Pratt, P. F. (1982) Lithium, sodium, and potassium. In AL Page, RH Miller, DR Keeney (Eds.), *Methods of Soil Analysis, Chemical and Microbiological Properties* (pp. 403–429). Madison, WI: SSSA, ASA.
- Manikandan, M., & Thiagarajan, G. (2021). Soil Moisture and Nutrient Patterns Under Subsurface Drip Irrigation for a Sustainable Sugarcane Initiative. In *Fertigation Technologies for Micro Irrigated Crops*. Apple Academic Press. 171-178.
- Mahgoub, N., Mohamed, A., El Sikhary, E., & Ali, O. (2017). Roots and Nutrient Distribution under Drip Irrigation and Yield of Faba Bean and Onion. *Open Journal of Soil Science*, 7, 52-67.
- Mohammed, A. T., & Irmak, S. (2022). Maize response to irrigation and nitrogen under center pivot, subsurface drip and furrow irrigation: Water productivity, basal evapotranspiration and yield response factors. *Agricultural Water Management*, 271, 107795.
- Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (1996). Total carbon, organic carbon and organic matter. In AL Page, RH Miller, DR Keeney (Eds.), *Methods of Soil Analysis, part III* (pp. 961–1010). Madison, WI: SSSA, ASA.
- Olsen, S. R., Cole, C. V., Watanabe, E. S., & Dean, L. A. (1954). Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. *United States Department of Agriculture Circular*, 939, 1-18.
- Rhoades JD (1996) Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. In AL Page, RH Miller, DR Keeney (Eds.), *Methods of Soil Analysis, Chemical and Microbiological Properties*. Madison, WI: SSSA, ASA.
- Safirzadeh, S., Chorom, M., & Enayatizamir, N. (2019). Effect of phosphate solubilising bacteria (*Enterobacter cloacae*) on phosphorus uptake efficiency in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). *Soil research*, 57(4), 333-341.
- Safirzadeh, S., Chorom, M., & Enayatizamir, N. (2021). Speciation and Fractionation of Phosphorus Affected by *Enterobacter cloacae* in the Rhizosphere of Sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21, 187–199.
- Sheini-Dashtgol, A. (2020). Effects of different installation depths and space of pressure controlled emitters in subsurface drip irrigation on moisture distribution, water productivity and quantity and quality yield sugarcane in southern Khuzestan climate conditions. PhD Thesis Irrigation and Drainage. Faculty of water science. Shahid chamran University, Ahvaz. (In Persian)
- Sheini-Dashtgol, A., Boroomand Nasab, S., & Naseri, A. A. (2020). Effects of subsurface drip irrigation on salinity dynamics, water productivity and ratoon sugarcane yield. *Journal of Water and Soil*, 34(4), 797-811. (In Persian)
- Sheini-Dashtgol, A., Hamoodi, M., Zanganeh Usef Abadi, E., & Zarei, S. (2024). Investigating the durability and efficiency of the subsurface drip irrigation system in the sugarcane fields in the south of Ahvaz. The 5th National Conference on Farm Water Management. (In Persian)
- Shen, J., Li, R., Zhang, F., Fan, J., Tang, C., & Rengel, Z. (2004). Crop yields, soil fertility and phosphorus fractions in response to long-term fertilization under the rice monoculture system on a calcareous soil. *Field Crop Research*, 86, 225-238.
- Yin, Y., & Liang, C. H. (2013). Transformation of phosphorus fractions in paddy soil amended with pig manure. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 13(4), 809-818.
- Wu, D., Xu, X., Chen, Y., Shao, H., Sokolowski, E., & Mi, G. (2019). Effect of different drip fertigation methods on maize yield, nutrient and water productivity in two-soils in Northeast China. *Agricultural Water Management*, 213, 200–211.
- Zanganeh Usef Abadi, E. (2018). Study of the dynamic of moisture and salinity under subsurface drip irrigation management of sugarcane in south of Ahvaz. PhD Thesis Irrigation and Drainage. Faculty of water science. Shahid chamran University, Ahvaz. (In Persian)
- Zhang, B., Fang, F., Guo, J., Chen, Y., Li, Z., & Guo, S. (2012). Phosphorus fractions and phosphate sorption-release characteristics relevant to the soil composition of water-level-fluctuating zone of Three Gorges Reservoir. *Ecological Engineering*, 40, 153-159.
- Zhang, M., Li, C., Li, Y. C., & Harris, W. G. (2014). Phosphate minerals and solubility in native and agricultural calcareous soils. *Geoderma*, 232-234, 164-171.