



Effects of salinity, phosphorus fertilizer, and intercropping of wheat with lathyrus, and vetch on available-P and inorganic P fractions in a loamy sand soil

Maryam Alizadeh¹ | Nosratollah Najafi² | Shahin Oustan³ | Aziz Majidi⁴

1. Soil Science Department, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: alizade.m1983@gmail.com
2. Corresponding Author, Soil Science Department, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: n-najafi@tabrizu.ac.ir
3. Soil Science Department, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: oustan@hotmail.com
4. Research and Education of Agriculture and Natural Resources Center of West Azarbaijan Province, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Urmia, Iran. E-mail: a.majidi@areeo.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: July. 30, 2024

Revised: Sep. 5, 2024

Accepted: Sep. 11, 2024

Published online: Dec. 2024

Keywords:

Ageing,
Bioavailability,
Phosphorus Fractionation,
Soil Salinization,
Plant Cultivation.

ABSTRACT

In this research, two separate experiments were carried out as factorial on the basis of completely randomized design with three replications. In the first experiment, the effects of cultivation, salinity, and phosphorus (P) fertilizer on available-P and inorganic P fractions were investigated with three factors of cultivation type at six levels (No cultivation, wheat monoculture, lathyrus monoculture, vetch monoculture, wheat-Lathyrus intercropping, wheat-vetch intercropping), P fertilizer at two levels (zero and 80 mg P/kg) and soil salinity (EC_e) at two levels (0.75 and 7.5 dS/m) under greenhouse conditions. The second experiment was conducted to investigate the effects of ageing, salinity, and P fertilizer on Olsen-P and inorganic P fractions with three factors of time at two levels (zero and 90 days), P at two levels (zero and 80 mg P/kg), and EC_e at two levels (0.75 and 7.5 dS/m) under laboratory conditions. Results showed that the cultivation of wheat, lathyrus, and vetch in both monoculture and intercropping conditions decreased Olsen-P, NH₄F-P, NaOH-P, H₂SO₄-P, and sum of P fractions. Under P using conditions, available-P in the rhizosphere soil was more than the one in bulk soil and in intercropping it was more than the one in monoculture. In 90 days after P using, NaCl salinity decreased NH₄Cl-P, NH₄F-P, and NaOH-P while increased Olsen-P and H₂SO₄-P compared to non-saline conditions. Aging after P using decreased NH₄Cl-P and Olsen-P and increased NH₄F-P, NaOH-P, and H₂SO₄-P. Under P using conditions, Olsen extractant may underestimate soil P availability for wheat, lathyrus, and vetch plants at both monoculture and intercropping conditions. Generally, intercropping of wheat-Lathyrus and wheat-vetch and using 80 mg P fertilizer per kg of soil can be recommended under similar conditions.

Cite this article: Alizadeh, M., Najafi, N., Oustan, S. & Majidi, A. (2024). Effects of salinity, phosphorus fertilizer, and intercropping of wheat with lathyrus, and vetch on available-P and inorganic P fractions in a loamy sand soil. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55 (10), 1823-1844. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.380118.669770>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.380118.669770>





EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The use of phosphorus (P) chemical fertilizers has increased as a result of the world's growing population and rising food demand. The world's non-renewable supply of phosphate rock, which is used to make P fertilizers, is expected to decrease due to this trend. Therefore, this research was conducted to investigate the effects of salinity, plant cultivation, cultivation method (monoculture and mixed cropping), P fertilizer, and the passage of time on the inorganic P forms and plant available-P. It is expected that mixed cropping can reduce the application of P fertilizers in both saline and non-saline conditions and improve the quality and quantity of agricultural crops.

Methodology

In this research, two separate experiments were carried out as factorial on the basis of completely randomized design with three replications. In the first experiment, the effects of cultivation, salinity, and P fertilizer on available-P and inorganic P forms were investigated with three factors of cultivation type at six levels (without cultivation, monoculture of wheat (*Triticum aestivum* L.), monoculture of lathyrus (*Lathyrus sativus* L.), monoculture of vetch (*Vicia sativa* L.), wheat-Lathyrus intercropping, and wheat-vetch intercropping), P fertilizer at two levels (zero and 80 mg P per kg soil as KH_2PO_4) and salinity of soil saturated extract (ECe) at two levels (0.75 and 7.5 dS/m as NaCl) under greenhouse conditions. The second experiment was conducted to investigate the effects of ageing, salinity, and P fertilizer on Olsen-P and inorganic P forms under uncultivated conditions with three factors of time at two levels (zero and 90 days) and P fertilizer and salinity (at the same levels of the first experiment). At the end of the growth period, the plants were harvested and the soil samples were immediately taken from the cultivated and uncultivated pots and the Olsen-P and inorganic P forms were determined using the Olsen and Kuo methods, respectively.

Results and Discussions

The results showed that the effects of salinity, cultivation, P fertilizer, and ageing on Olsen-P and all inorganic P fractions were significant. Cultivation of wheat, lathyrus, and vetch plants in both monoculture and intercropping conditions decreased Olsen-P, $\text{NH}_4\text{F-P}$, NaOH-P , $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-P}$, and sum of P fractions compared to the without cultivation at both with and without P fertilizer conditions. However, in P fertilized conditions, the sum of Olsen-P and plant P uptake (Olsen-P+Puptake) under all three plants cultivation conditions (monoculture and intercropping) was more than the uncultivated pots, which indicates an increase in the bioavailability of P in the rhizosphere soil of these plants. In uncultivated conditions and 90 days after P fertilizer using, NaCl salinity decreased the amount of $\text{NH}_4\text{Cl-P}$, $\text{NH}_4\text{F-P}$, and NaOH-P while increased Olsen-P and $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-P}$ compared to the non-saline conditions. In uncultivated conditions and no-application of P fertilizer, NaCl salinity had no significant effect on Olsen-P and all inorganic P fractions. Immediately after P fertilizer application in the soil, Olsen-P, $\text{NH}_4\text{Cl-P}$, and sum of P fractions were increased, while $\text{NH}_4\text{F-P}$, NaOH-P , and $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-P}$ did not change significantly. In 90 days after using P fertilizer in the soil compared to the first day, $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ and Olsen-P were decreased while $\text{NH}_4\text{F-P}$, NaOH-P , and $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-P}$ were increased.

Conclusion

The results showed that under P fertilizer application conditions, the Olsen extractant may underestimate the amount of available-P for wheat, lathyrus, and vetch plants in the studied soil at both cultivation methods (monoculture and intercropping). Soil salinization by NaCl salt had different effects on Olsen-P and all inorganic P fractions under with and without P application conditions. Under P using conditions, available-P was more in the rhizosphere soil (cultivated) than the bulk soil (uncultivated) and in the intercropping than the monoculture. In general, in both saline and non-saline conditions, the mixed culture of wheat- Lathyrus and wheat-vetch and application of P fertilizer at the rate of 80 mg P/kg are recommended at the same conditions.

Author Contributions

Conceptualization, M.A. and N.N.; methodology, M.A. and N.N.; software, M.M. and N.N.; validation, M.A., N.N., S.O., and A.M.; formal analysis, M.M. and N.N.; investigation, M.A.; resources, M.M. and N.N.; data curation, M.A. and N.N.; writing—original draft preparation, M.A. and N.N.; writing—review and editing, N.N., S.O., and A.M.; visualization, M.A. and N.N.; supervision, N.N.; project administration, N.N.; funding acquisition, N.N. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

Data is available on reasonable request from the authors.

Acknowledgements

This paper is published as a part of a Ph.D. dissertation supported by the Vice Chancellor for Research

and Technology of the University of Tabriz, Iran. The authors are thankful to the University of Tabriz for financial supports.

Ethical considerations

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

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

اثر شوری، کود فسفر و کشت مخلوط گندم با خلر و ماشک بر فسفر قابل جذب و شکل‌های فسفر معدنی در یک خاک شن لومی

مریم علیزاده^۱ | نصرت‌اله نجفی^۲ | شاهین اوستان^۳ | عزیز مجیدی^۴۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: alizade.m1983@gmail.com۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: n-najafi@tabrizu.ac.ir۳. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: oustan@hotmail.com۴. مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه، ایران. رایانامه: a.majidi@arceo.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	در این پژوهش، دو آزمایش جداگانه هر یک به صورت فاکتوریل و در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی و با سه تکرار انجام شد. در آزمایش اول، اثر کشت، شوری و کود فسفر بر Olsen-P و شکل‌های فسفر معدنی با سه عامل نوع کشت در شش سطح (بدون کشت، تک کشتی گندم، تک کشتی خلر، تک کشتی ماشک، کشت مخلوط گندم-خلر، کشت مخلوط گندم-ماشک)، کود فسفر در دو سطح (صفر و ۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و شوری خاک (ECe) در دو سطح (۰/۷۵ و ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر) بررسی شد. آزمایش دوم برای بررسی اثر زمان، شوری و کود فسفر بر Olsen-P و شکل‌های فسفر معدنی در شرایط بدون کشت با سه عامل زمان در دو سطح (صفر و ۹۰ روز) و کود فسفر و شوری (با همان سطوح آزمایش اول) انجام شد. نتایج نشان داد که کشت گیاهان گندم، خلر و ماشک در هر دو شرایط تک کشتی و کشت مخلوط، Olsen-P، $\text{NH}_4\text{F-P}$ ، NaOH-P ، $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-P}$ و مجموع شکل‌های فسفر خاک را کاهش داد. در شرایط با کود فسفر، Available-P در خاک ریزوسفر بیشتر از خاک توده و در کشت مخلوط بیشتر از تک کشتی بود. ۹۰ روز پس از مصرف کود فسفر، شوری سدیم کلرید در خاک، $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ ، $\text{NH}_4\text{F-P}$ و NaOH-P را کاهش و Olsen-P و $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-P}$ را افزایش داد. مسن شدن پس از مصرف کود فسفر، $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ و Olsen-P را کاهش و NaOH-P ، $\text{NH}_4\text{F-P}$ و $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-P}$ را افزایش داد. در شرایط با کود فسفر، عصاره‌گیر Olsen ممکن است مقدار Available-P گندم، خلر و ماشک را در شرایط تک کشتی و کشت مخلوط کمتر برآورد نماید. کشت مخلوط گندم-خلر و گندم-ماشک و مصرف ۸۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک در شرایط مشابه می‌تواند توصیه شود.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۵/۹	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۶/۱۰۵	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۶/۲۱	
تاریخ انتشار: دی‌ماه ۱۴۰۳	
واژه‌های کلیدی: زیست‌فراهمی، شور شدن خاک، عصاره‌گیری دنباله‌ای فسفر، کشت گیاه، مسن شدن.	

استناد: علیزاده، مریم؛ نجفی، نصرت‌اله؛ اوستان، شاهین؛ مجیدی، عزیز. (۱۴۰۳). اثر شوری، کود فسفر و کشت مخلوط گندم با خلر و ماشک بر فسفر قابل جذب و شکل‌های فسفر معدنی در یک خاک شن لومی. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۵ (۱۰)، ۱۸۴۴-۱۸۲۳.



<https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.380118.669770>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.380118.669770>

مقدمه

استفاده بهینه از فسفر بومی خاک و استفاده کمتر از کودهای شیمیایی فسفر برای دستیابی به کشاورزی پایدار و حفظ محیط‌زیست اهمیت زیادی دارد (Cordell et al., 2009). با این حال، آمارهای انجمن بین‌المللی کود نشان می‌دهد که مصرف کود فسفر در جهان از سال ۱۹۶۱ تا ۲۰۱۹، ۳۴/۵ میلیون تن افزایش یافته‌است (IFA, 2021). رشد سریع جمعیت از یک طرف و افزایش تقاضا برای غذا از طرف دیگر، سبب افزایش مصرف کودهای شیمیایی فسفر شده‌است (Tian et al., 2021). با این روند، ذخیره سنگ فسفات در جهان که منبع اصلی و تجدیدنپذیر تولید کودهای فسفر است، کاهش خواهد یافت (Cordell et al., 2009). از طرف دیگر، مصرف طولانی‌مدت کود فسفر سبب ورود فسفر به رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و آب‌های زیرزمینی و وقوع پدیده غنی‌شدن آب‌های سطحی می‌شود (Ma et al., 2022). زیست‌فراهمی فسفر در خاک به‌وسیله فرایندهای حل‌شدن، رسوب، جذب، معدنی‌شدن و آلی‌شدن کنترل می‌شود (Yu et al., 2021). از عامل‌های مؤثر بر مقدار فسفر قابل جذب گیاه در خاک می‌توان به pH خاک، شوری خاک، درصد اکسید و هیدرواکسیدهای آهن و آلومینیم، نوع و مقدار رس، درصد آهک، درصد گچ، نوع و مقدار مواد آلی خاک، دمای خاک، رطوبت خاک و غیره اشاره کرد (Appelhans et al., 2021; Schaap et al., 2021). کنترل غلظت فسفر در خاک به‌وسیله فرایندهای جذب سطحی اکسید/هیدرواکسیدهای آهن و آلومینیم و حل‌پذیری کم کانی‌های کلسیم فسفات را می‌توان از دلایل کاهش جذب فسفر در شرایط تنش شوری بیان کرد. در چنین شرایطی، شکل‌های فسفات با پایداری کم با گذشت زمان به ترکیب‌های پایدارتری تبدیل می‌شوند و در نتیجه فسفر قابل جذب گیاه کاهش می‌یابد (Grattan & Grieve, 1999).

فسفر در خاک به دو شکل آلی و معدنی وجود دارد. فسفر آلی برای اینکه قابل جذب گیاه شود، باید در خاک به فسفر معدنی تبدیل شود. به دلیل کاربرد طولانی‌مدت کودهای شیمیایی فسفر در خاک‌های کشاورزی و کمبود مواد آلی در آن‌ها، شکل معدنی فسفر در خاک غالب است. بنابراین، تعیین شکل‌های فسفر معدنی، فسفر قابل جذب و تغییرات این شکل‌ها بر اثر عامل‌های خاک و گیاه، می‌تواند به شناخت بهتر چگونگی پاسخ گیاه به کود فسفر کمک نماید (Najafi & Towfighi, 2006; Marschner, 2012; Yan et al., 2022). کشت مخلوط، کشت دو یا بیش از دو گیاه در کنار هم و در یک فصل رشد به جای کشت فقط یک گیاه است. کشت مخلوط برای بازداری آفت‌ها و سلامتی گیاه، گرده‌افشانی بهتر، فراهم کردن زیست‌جا برای جانداران مفید و بهبود تنوع زیستی، استفاده بهینه از زمین، بهبود حاصلخیزی خاک، افزایش بازدهی و قابلیت تولید محصول‌های کشاورزی، افزایش کارایی مصرف فسفر، کاهش مصرف کودهای شیمیایی و دستیابی به کشاورزی پایدار انجام می‌شود (McClure & Roth, 1994; Eichler-Löbermann et al., 2016). رایج‌ترین هدف از کشت مخلوط بازدهی بیشتر دو محصول در مجاورت یکدیگر است که در کشت به‌صورت جداگانه نمی‌توان به آن بازدهی دست یافت (Ouma & Jeruto, 2010; Eichler-Löbermann et al., 2016). گزارش نمودند که میزان محصول در کشت مخلوط ذرت و لوبیا با تک‌کشتی ذرت برابر بود اما میزان مصرف کود نیتروژن در کشت مخلوط ذرت و لوبیا نصف تک‌کشتی ذرت بود. Yang et al. (2022) گزارش دادند که کشت مخلوط و مصرف کود فسفر می‌توانند شکل‌های مختلف فسفر در خاک را تغییر دهند؛ آنان مشاهده کردند که کشت مخلوط ذرت - بادام زمینی و ذرت - سویا، سبب افزایش غلظت فسفر قابل تبادل، فسفر محلول خاک و فسفر قابل آبکافت و افزایش جذب فسفر به‌وسیله گیاه ذرت و کاهش هدررفت فسفر از خاک و کاهش ورود آن به آب‌های زیرزمینی شد. در یک بررسی مشاهده شد که کشت مخلوط سویا - سورگوم، کارایی مصرف فسفر را افزایش داد (Ghosh et al., 2009). همچنین، کشت مخلوط گیاهان لگوم - گرامینه می‌تواند با آزادسازی آنیون‌های آلی و آنزیم‌های فسفاتاز و تبدیل شکل‌های مختلف فسفر به فسفر محلول، فسفر قابل جذب گیاه در خاک را افزایش دهد (Sun et al., 2020).

پیشینه پژوهش

Hinsinger et al. (2011) گزارش دادند که کشت مخلوط غلات و لگوم‌ها با افزایش آزادسازی تراوه‌های ریشه و بهبود فعالیت ریزجانداران خاک باعث افزایش فسفر قابل جذب گیاه در خاک شد. Liao et al. (2022) مشاهده کردند که کشت مخلوط غلات - لگوم در یک خاک آهکی دارای کمبود فسفر، باعث افزایش جذب فسفر به‌وسیله هر دو گیاه و عملکرد دانه آن‌ها شد. ریشه گیاهان لگوم نسبت به غلات، مقادیر بیشتری پروتون (Hinsinger et al., 2003)، کربوکسیلات‌ها مانند ملات و سترات (Pearse et al., 2006) و آنزیم‌های فسفاتاز (Makoi et al., 2010) را ترشح می‌کند که می‌تواند در کشت مخلوط غلات-لگوم برای غلات سودمند باشد. Liao et al. (2022) نشان دادند که کشت مخلوط ذرت - لوبیا باعث جذب فسفر از منابع با قابلیت جذب کم و کاهش غلظت آن می‌شود درحالی‌که

لوبیا در روش تک‌کشتی، فسفر را از منابع قابل جذب و نسبتاً قابل جذب، جذب کرده و غلظت آن‌ها را کاهش می‌دهد. (Li et al. (2008) نشان دادند که کاشت گندم، شکل‌های $\text{NaHCO}_3\text{-P}$ ، Resin-P و NaOH-P را در خاک ریزوسفر نسبت به خاک توده کاهش داد. با انجام مطالعات مربوط به عصاره‌گیری دنباله‌ای فسفر و تعیین شکل‌های فسفر در شرایط با و بدون کشت گیاه می‌توان تعیین کرد که گیاه کدام یک از شکل‌های فسفر را در خاک‌های مختلف و در شرایط تنش شوری جذب می‌کند. بنابراین، این پژوهش، برای بررسی اثر شوری، کشت گیاه، روش کشت (تک‌کشتی و کشت مخلوط)، کود فسفر و گذشت زمان بر شکل‌های فسفر معدنی و فسفر قابل جذب گیاه در خاک در شرایط گلخانه‌ای انجام شد. انتظار این است که کشت مخلوط بتواند مصرف کودهای فسفر را در شرایط شور و غیرشور کاهش دهد و کیفیت و کمیت محصول‌های کشاورزی را بهبود بخشد. بررسی منابع نشان داد که تا کنون چنین مطالعه‌ای انجام نشده است.

روش‌شناسی پژوهش

نمونه‌برداری و تعیین ویژگی‌های خاک

این پژوهش در مرکز تحصیلات تکمیلی دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز در سال ۱۴۰۱ اجرا شد. خاک مورد استفاده در این پژوهش، به صورت تصادفی از عمق صفر تا ۲۵ سانتی‌متری نقاط مختلف مزرعه‌ای در ایستگاه تحقیقات کشاورزی خلعت‌پوشان دانشگاه تبریز با طول جغرافیایی $26^{\circ}23'36''/2^{\circ}$ شرقی و عرض جغرافیایی $38^{\circ}10'55''$ شمالی نمونه‌برداری و نمونه مرکب تهیه شده به آزمایشگاه منتقل شد. پس از هواخشک شدن، خاک از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن تعیین گردید. بافت خاک به روش هیدرومتری (Gee & Or, 2002)، کلسیم کربنات معادل به روش خنثی‌سازی با اسید و تیتر کردن با سود (Allison & Moodie, 1965)، کربن آلی خاک به روش اکسایش تر (Nelson & Sommers, 1996)، pH خاک در تعلیق ۱:۱ آب به خاک (Thomas, 1996)، EC در عصاره تعلیق ۱:۱ آب به خاک (Rhoades, 1996)، فسفر قابل جذب گیاه در خاک به روش اولسن (Kuo, 1996)، Cu ، Fe ، Mn و Zn قابل جذب به روش عصاره‌گیری با DTPA و با دستگاه جذب اتمی (Lindsay & Norvell, 1987) و K و Na قابل جذب به روش عصاره‌گیری با آمونیوم استات و قرائت با دستگاه فلیم فتومتر (Jones, 2001) تعیین شدند.

اعمال تیمارها و اجرای آزمایش

دو آزمایش جداگانه هر یک به صورت فاکتوریل و در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی و با سه تکرار در یک خاک شن لومی انجام شد. آزمایش اول برای بررسی اثر کشت، شوری و کود فسفر بر فسفر قابل جذب و شکل‌های فسفر معدنی، با سه عامل نوع کشت در شش سطح (بدون کشت، تک‌کشتی گندم (*Triticum aestivum* L.)، تک‌کشتی خلر (*Lathyrus sativus* L.)، تک‌کشتی ماشک (*Vicia sativa* L.)، کشت مخلوط گندم - خلر، کشت مخلوط گندم - ماشک)، کود فسفر در دو سطح (صفر و 80 mg P/kg خاک از منبع KH_2PO_4) و شوری عصاره اشباع خاک (EC_e) در دو سطح ($0/75$ و $7/5 \text{ dS/m}$ از منبع NaCl) در شرایط گلخانه‌ای انجام شد. آزمایش دوم برای بررسی اثر زمان، شوری و کود فسفر بر فسفر قابل جذب و شکل‌های فسفر معدنی در شرایط بدون کشت با سه عامل زمان در دو سطح (صفر و ۹۰ روز) و دو عامل کود فسفر و شوری در همان سطوح آزمایش قبلی در شرایط آزمایشگاهی انجام شد. در هر دو آزمایش، برای حذف اثر پتاسیم همراه کود پتاسیم دی‌هیدروژن فسفات (KH_2PO_4)، در تیمارهای بدون کود فسفر از منبع پتاسیم کلرید (KCl) استفاده شد. در هر یک از گلدان‌های با کشت و بدون کشت، از سه کیلوگرم خاک عبور یافته از الک چهار میلی‌متری استفاده شد. برای تأمین عنصرهای غذایی مورد نیاز گیاهان، بر اساس نتایج آزمون خاک، یک میلی‌گرم بور از منبع بوریک اسید (H_3BO_3)، ۸ میلی‌گرم منگنز از منبع منگنز سولفات (MnSO_4)، ۱۰ میلی‌گرم آهن از منبع آهن (II) سولفات (FeSO_4)، ۲ میلی‌گرم مس از منبع مس سولفات (CuSO_4)، ۱۵۰ میلی‌گرم نیتروژن از منبع اوره ($\text{N}_2\text{H}_4\text{CO}$)، ۱۸۶ میلی‌گرم پتاسیم (در تیمارهای بدون کود فسفر)، ۱۸۶ میلی‌گرم پتاسیم از منبع پتاسیم دی‌هیدروژن فسفات در تیمارهای با کود فسفر و ۱۴۱ میلی‌گرم منیزیم از منبع منیزیم سولفات (MgSO_4) به صورت محلول به هر کیلوگرم خاک افزوده و خوب مخلوط شدند تا به طور یکنواخت در خاک توزیع شوند.

بعد از آماده‌سازی بستر کشت، بذره‌های گندم بهاره رقم زاگرس تهیه شده از قطب علمی اصلاح مولکولی غلات دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز و بذره‌های خلر و ماشک تهیه شده از مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی با محلول ۰/۵ درصد سدیم هیپوکلریت ضدعفونی و در میان چند لایه پارچه متقالی با رطوبت مناسب، جوانه‌دار شده و تعداد ۲۰ عدد از آن‌ها در هر گلدان کاشته شدند. بعد از دو هفته رشد، تعداد گیاهان در هر گلدان با حذف گیاهان ضعیف به ۱۴ عدد کاهش یافت. در تیمارهای کشت

مخلوط از هر گیاه هفت بوته در گلدان (در مجموع ۱۴ گیاه) نگهداری شد. آبیاری گلدان‌ها روزانه بر اساس ۸۰ درصد ظرفیت مزرعه‌ای و از طریق توزین گلدان‌های با کشت و بدون کشت و با استفاده از آب لوله‌کشی شهر تبریز انجام شد. نتایج تجزیه آب آبیاری مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شد.

جدول ۱. ویژگی‌های شیمیایی آب مورد استفاده در گلخانه

غلظت عنصر (mg L ⁻¹)								EC (dS m ⁻¹)	pH	
مس	منگنز	روی	آهن	سدیم	منیزیم	کلسیم	پتاسیم	فسفر		
۰/۱	ناچیز	۰/۸	ناچیز	۱۶/۵	۷/۴	۵/۷	۴/۹	ناچیز	۰/۴۹	۶/۹۷

تمام شرایط اعمال شده بر گلدان‌های کشت شده در گلدان‌های کشت نشده نیز هم‌زمان اعمال شد. برای اعمال سطوح شوری، با انجام یک پیش‌آزمایش، رابطه میان غلظت سدیم کلرید افزوده شده به خاک و EC عصاره اشباع خاک با برازش یک معادله رگرسیونی مشخص شد. با استفاده از این معادله رگرسیونی، مقدار نمک سدیم کلرید مورد نیاز برای رساندن EC آن به ۷/۵ dS/m تعیین شد. همچنین، حجم و غلظت محلول سدیم کلرید مورد نیاز بر اساس پیش‌آزمایش انجام شده تعیین شد. در تیمارهای دارای شوری سدیم کلرید، پس از استقرار گیاهان و در مرحله پنج برگی، خاک گلدان‌ها به تدریج در سه مرحله با فاصله دو روز با محلول سدیم کلرید با غلظت معین آبیاری شدند تا به شوری ۷/۵ dS/m برسند. در خاک هواخشک و ۹۵ روز پس از کاشت بذر هر سه گیاه (هنگام رسیدگی و برداشت گیاهان)، از خاک گلدان‌های با کشت و بدون کشت هم‌زمان نمونه خاک تهیه و فسفر قابل جذب به روش اولسن (Kuo, 1996) و شکل‌های فسفر معدنی به روش Kuo (1996) اندازه‌گیری شدند. خلاصه روش عصاره‌گیری متوالی مورد استفاده در تعیین شکل‌های فسفر معدنی در خاک غیرآهکی مورد مطالعه در جدول ۲ ارائه شد. چون مقدار فسفر قابل استخراج با سیترات - بیکربنات - دیتینیت (CBD-P) یا فسفر محبوس در آهن اکسیدها ناچیز بود، از ارائه نتایج این مرحله صرف‌نظر شد. ناچیز بودن غلظت CBD-P به‌وسیله سایر پژوهشگران نیز گزارش شده‌است (Najafi and Towfighi, 2013; Safari Sinegani and Rashidi, 2011). غلظت فسفر در عصاره‌های مختلف با روش آبی اسکوربیک اسید اندازه‌گیری شد (Kuo, 1996).

جدول ۲. روش عصاره‌گیری متوالی مورد استفاده در تعیین شکل‌های فسفر معدنی در خاک غیرآهکی مورد مطالعه (Kuo, 1996)

مرحله عصاره‌گیری	ترکیب عصاره‌گیر	نسبت جرم خاک (g) به حجم عصاره‌گیر (mL)	مدت تکان دادن (ساعت)	شکل استخراج شده
۱	1M NH ₄ Cl	۱:۵۰	۰/۵	فسفر به‌سهولت محلول (NH ₄ Cl-P)
۲	pH=۸/۲ با 0.5M NH ₄ F	۱:۵۰	۱	آلومینیم فسفات (Al-P or NH ₄ F-P)
۳	0.1N NaOH	۱:۵۰	۱۷	آهن فسفات (Fe-P or NaOH-P)
۴	Na ₃ C ₆ H ₅ O ₇ .2H ₂ O+ Na ₂ S ₂ O ₄ .2H ₂ O+NaHCO ₃	-	-	فسفر محبوس در اکسیدهای آهن (CBD-P)
۵	0.25M H ₂ SO ₄	۱:۵۰	۱	آپاتیت (Ca ₁₀ -P or H ₂ SO ₄ -P)

تجزیه و تحلیل آماری

تحلیل آماری داده‌ها شامل آزمون نرمال بودن توزیع داده‌ها، تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها با نرم‌افزار MSTATC، رسم نمودارها با نرم‌افزار Excel و مقایسه میانگین‌ها با آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شدند.

یافته‌های پژوهش

ویژگی‌های خاک مورد مطالعه

در جدول ۳ برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک مورد مطالعه ارائه شده‌است. این خاک غیرشور و با بافت سبک و دارای کمبود ماده آلی، نیتروژن، فسفر، پتاسیم، آهن، روی، مس و منگنز بود (Hazelton & Murphy, 2016).



جدول ۳. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

بافت خاک	رس (%)	سیلت (%)	شن (%)	pH(۱:۱)	ECe (dS/m)(۱:۱)	کربن آلی (%)	نیترژن (%)
شن لومی	۱۲	۱۸	۷۰	۷/۶۳	۰/۷۵	۰/۱۱	۰/۰۱۲
غلظت عنصرهای قابل جذب گیاه در خاک (mg/kg)							
آهک (%)	P	K	Na	Fe	Zn	Cu	Mn
ناچیز	۶/۸	۱۸۸	۸۱/۷	۲/۱۳	۰/۶۵	۰/۵۶	۰/۷۳

تأثیر شوری، کود فسفر، نوع کشت و گذشت زمان بر فسفر قابل جذب گیاه در خاک تجزیه واریانس نشان داد که اثرهای اصلی نوع کشت، شوری، کود فسفر و زمان بر فسفر قابل جذب گیاه در خاک معنادار بودند. همچنین، به استثنای اثرهای متقابل کود فسفر × شوری و زمان × کود فسفر × شوری، سایر اثرهای متقابل بر فسفر قابل جذب گیاه در خاک معنادار بودند (جدول‌های ۴ و ۵). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که مصرف کود فسفر در شرایط شور و غیرشور و با و بدون کشت، فسفر قابل جذب گیاه در خاک را به‌طور معنادار افزایش داد و میزان این افزایش در شرایط بدون کشت بیشتر از تیمارهای با کشت بود که با نتایج Najafi and Towfighi (2012) and Towfighi (2012) مطابقت داشت. (Kuczak et al. (2006)، Najafi and Towfighi (2013) و Motalebifard et al. (2014) نیز گزارش کردند که مصرف کود فسفر باعث افزایش فسفر معدنی قابل استخراج و فسفر قابل جذب گیاه در خاک شد. نتایج نشان داد که گیاهان گندم، خلر و ماشک در هر دو روش تک‌کشتی و کشت مخلوط تمام کود فسفر مصرفی را جذب نکردند و در انتهای دوره رشد این گیاهان، بخشی از کود فسفر مصرف شده در خاک باقی ماند (شکل ۱-A)، که می‌تواند به‌وسیله گیاهان در کشت بعدی استفاده شود. (Tandon (1987 گزارش داد که بیشتر گیاهان کمتر از ۲۰ درصد کود فسفر را جذب می‌کنند. در نتیجه، میزان فسفر قابل جذب خاک بعد از برداشت گیاه در تیمار با کود فسفر افزایش می‌یابد (Kulhánek et al., 2018). باین‌حال، غلظت فسفر قابل جذب گیاه در خاک تمام گلدان‌های با کشت در انتهای دوره رشد، از سطح بحرانی ۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک (Hazelton & Murphy, 2016) کمتر بود. این نتیجه نشان می‌دهد برای اینکه غلظت فسفر قابل جذب گیاه در خاک در انتهای دوره رشد گیاه به کمتر از سطح بحرانی نمی‌رسید، لازم بود کود فسفر بیشتری مصرف می‌شد.

جدول ۴. تجزیه واریانس اثر شوری، کشت و کود فسفر بر Olsen-P، Olsen-P+Pupt و شکل‌های فسفر معدنی در خاک مورد مطالعه.

مجموع شکل‌ها	میانگین مربعات					Olsen-P+Pupt	Olsen-P	درجه آزادی	منبع تغییر
	H ₂ SO ₄ -P	NaOH-P	NH ₄ F-P	NH ₄ Cl-P					
۸۱/۲*	۴/۹ ^{ns}	۶/۴**	۱۸/۵**	۲۰/۲**	۴۲/۶**	۳۲/۵**	۱	شوری	
۱۵۸۱۶/۸**	۲۰۸۱/۵**	۲۱/۱۵**	۲۹/۱**	۶۵/۴**	۲۲۵/۸**	۵۷/۲**	۵	کشت	
۳۴۵۴۵/۱**	۹۲۳۶/۶**	۱۵۶/۰۵**	۵۹۳/۴**	۲۸۰۰/۰**	۷۰۵۷/۳**	۹۳۳/۱**	۱	کود فسفر	
۸۰/۰**	۱۲۸/۲**	۰/۱۱۷ ^{ns}	۲/۰۹**	۱/۷**	۱/۸۱۹ ^{ns}	۰/۷۴*	۵	کشت × شوری	
۲/۵ ^{ns}	۲۴/۶ ^{ns}	۱/۵**	۹/۰۳**	۵/۲**	۱۷/۸*	۹/۲**	۱	کود فسفر × شوری	
۴۰۸/۴**	۲۰۴/۹**	۳/۶**	۶/۶**	۳۸/۱۳**	۸۷/۲**	۱۹/۷**	۵	کود فسفر × نوع کشت	
۲۱/۵ ^{ns}	۱۹/۰۶**	۱/۳۰**	۱/۱۳**	۰/۳۷**	۰/۹۴۲ ^{ns}	۱/۴۷**	۵	فسفر × کشت × شوری	
۱۴/۹	۱۳/۷	۰/۰۸	۰/۱۹	۰/۱۰۲	۳/۳	۰/۳۹	۴۸	خطای آزمایشی	
۱/۰	۱/۱	۶/۱	۳/۹	۳/۷	۱۰/۱	۷/۷	-	ضریب تغییرات (%)	

^{ns}، * و **، به ترتیب غیرمعنادار و معنادار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

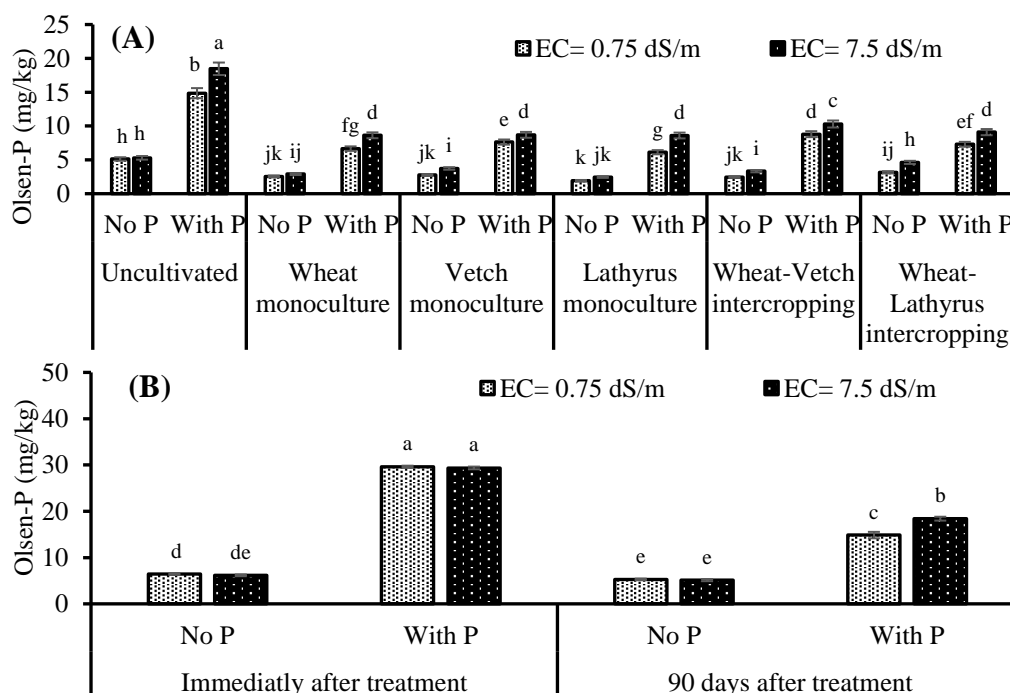
مقایسه میانگین‌ها نشان داد که کشت گیاهان گندم، خلر و ماشک در هر دو روش تک‌کشتی و کشت مخلوط، غلظت فسفر قابل جذب گیاه در خاک را در هر دو شرایط شور و غیرشور و با و بدون کود فسفر نسبت به تیمار بدون کشت به‌طور معنادار کاهش داد و میزان کاهش هم در روش‌های مختلف کشت متفاوت بود (شکل ۱-A)، که ناشی از جذب متفاوت فسفر به‌وسیله این گیاهان در روش‌های مختلف کاشت و متفاوت بودن فرایندهای ریزوسفر بود. این نتایج با گزارش‌های سایر پژوهشگران مطابقت داشت (Najafi & Towfighi, 2006; Boschetti et al., 2009; Ma et al., 2009; Najafi & Towfighi, 2012). در تیمار با کود فسفر و در هر دو شرایط شور و غیرشور،

بیشترین غلظت فسفر قابل جذب گیاه در خاک پس از برداشت گیاهان مختلف در خاک به میزان ۱۰/۳ میلی گرم در کیلوگرم، در کشت مخلوط گندم - ماشک مشاهده شد اما در شرایط بدون کود فسفر و شور، بیشترین غلظت فسفر قابل جذب گیاه در خاک، در کشت مخلوط گندم - خلر به میزان ۴/۶ میلی گرم در کیلوگرم، مشاهده شد (شکل ۱- A). این یافته‌ها نشانگر بیشتر بودن غلظت فسفر قابل جذب گیاه در خاک تیمارهای کشت مخلوط بود که مشابه دینامیک فسفر در کشت مخلوط سویا - گندم دوروم بود که به وسیله Li et al. (2001) گزارش شد. Najafi & Mostafae (2015) مشاهده نمودند که غلظت فسفر بخش هوایی ذرت در کشت مخلوط ذرت-لوبیا و ذرت-گاودانه به طور معناداری بیشتر از تک کشتی ذرت بود. آنان بیان کردند که کشت مخلوط ذرت-لوبیا و ذرت-گاودانه سبب بهبود تغذیه گیاه ذرت نسبت به تک کشتی شد. Betencourt et al. (2012) بیان کردند که تولید گیاهان در کشت مخلوط ماشک - کلزا بیشتر از تک کشتی آن‌ها بود. این افزایش به بهبود تغذیه نیتروژن و فسفر هر دو گیاه نسبت داده شد. همچنین، بررسی‌ها نشان دادند که کشت مخلوط لگوم با گندم یا ذرت باعث افزایش فسفر قابل جذب گیاه در خاک در مقایسه با تک کشتی گندم یا ذرت شد (Liao et al., 2020; Messaoudi et al., 2020). Wang et al. (2017) نشان دادند که کشت مخلوط ذرت - سویا، میزان فسفر قابل جذب گیاه در خاک را نسبت به تک کشتی آن‌ها افزایش داد.

جدول ۵. تجزیه واریانس اثر زمان، شوری و کود فسفر بر فسفر قابل جذب و شکل‌های فسفر معدنی در خاک مورد مطالعه در شرایط بدون کشت.

منبع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات				
		H ₂ SO ₄ -P	NaOH-P	NH ₄ F-P	NH ₄ Cl-P	Olsen-P
زمان	۱	۵۴۹۰/۳**	۸۴/۳**	۱۵۵/۰**	۱۴۴۱/۵**	۱۶۸۳/۳**
شوری	۵	۱۱۷/۰ ns	۲/۰۴۳**	۹/۳**	۴/۱۶ ns	۲۵۴۲/۰**
کود فسفر	۱	۱۶۸۳/۳**	۴۰/۰۴**	۷۷/۰۴**	۹۶۳۹/۶**	۱۸۷/۰۴**
کود فسفر × شوری	۵	۲۶/۰۴ ns	۰/۸*	۳/۳**	۰/۰۸ ns	۷/۰۴ ns
زمان × شوری	۱	۷۷/۰۴ ns	۰/۰۴۳ ns	۵/۰۴**	۲/۶*	۲۱۴۷/۰**
زمان × کود فسفر	۵	۱۵۲۰/۰**	۳۵/۰۴**	۱۰۸/۳**	۶۰/۰**	۲۰۷/۱**
زمان × کود فسفر × شوری	۵	۱۵/۰۴ ns	۱/۰۴**	۳/۳**	۲/۵ ns	۴/۴ ns
خطای آزمایشی	۴۸	۳۱/۸	۰/۱۶۷	۰/۳۳	۰/۵۴۲	۱/۰۴
ضریب تغییرات (%)	-	۱/۵	۷/۲	۵/۲	۳/۶	۵/۲

ns، * و **، به ترتیب غیرمعنادار و معنادار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد



شکل ۱. اثر متقابل شوری، کود فسفر و نوع کشت (A) و اثر متقابل شوری، کود فسفر و زمان (B) بر فسفر قابل جذب گیاه در خاک.



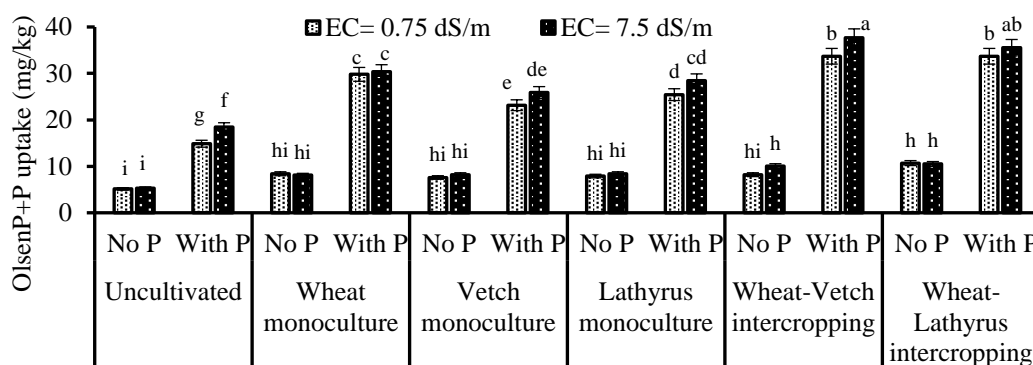
Souid et al. (2024) گزارش کردند که زیست‌فراهمی فسفر در خاک ریزوسفر گیاهان گندم و نخود در هر دو روش کشت (کشت مخلوط و تک‌کشتی) نسبت به خاک توده افزایش یافت. ریشه گیاهان از طریق افزایش مواد آلی، افزایش فعالیت و جمعیت ریزجانداران حل‌کننده فسفات، افزایش فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز، ترشح اسیدهای آلی و اسیدی کردن سبب بهبود پویایی و زیست‌فراهمی فسفر در خاک ریزوسفر می‌شود (Hinsinger, 2001; Marschner, 2012). Bagayoko et al. (2000) گزارش کردند که بر اثر تغییرات pH خاک ریزوسفر پس از کشت غلات و لگوم‌های مختلف، زیست‌فراهمی فسفر در مجاورت ریشه‌ها ۱۹۰ تا ۲۷۰ درصد نسبت به خاک کشت نشده افزایش یافت. Jia-En et al. (2009) گزارش دادند که در کشت مخلوط ذرت و بادام زمینی غلظت عنصرهای غذایی و جمعیت میکروبی (تنوع زیستی) در ریزوسفر هر دو گیاه نسبت به شرایط تک‌کشتی بهبود یافت و سبب بهبود تغذیه و رشد هر دو گیاه شد. Pearse et al. (2006) مشاهده کردند که pH و ترکیب کربوکسیلات‌های خاک ریزوسفر گندم و ۱۱ لگوم مختلف متفاوت بود و میزان تراوه‌های ریشه به سطح فسفر قابل جذب گیاه در خاک بستگی داشت. نتایج مشابهی به‌وسیله Lyu et al. (2016) نیز گزارش شد. بنابراین، مخلوط شدن تراوه‌های ریشه دو گیاه در کشت مخلوط، باعث اصلاح خاک ریزوسفر و افزایش فراهمی آب و عنصرهای غذایی برای هر دو گیاه می‌شود. در نتیجه، تغذیه و رشد هر دو گیاه در کشت مخلوط بهبود می‌یابد.

مقایسه میانگین‌ها نشان داد که مقدار فسفر قابل جذب گیاه در خاک در هر دو شرایط شور و غیرشور و هر دو تیمار با و بدون کود فسفر، پس از ۹۰ روز خواباندن در رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای نسبت به زمان صفر و بدون کشت گیاه، به‌طور معنادار کاهش یافت که ناشی از تبدیل کود فسفر مصرف‌شده در خاک به شکل‌های غیرقابل جذب بر اثر فرایندهای رسوب و جذب سطحی بود. این کاهش در تیمار با کود فسفر در شرایط غیرشور و شور به ترتیب ۴۹/۸ و ۳۷/۳ درصد و در تیمار بدون کود فسفر در شرایط غیرشور و شور به ترتیب ۱۷/۶ و ۱۶/۷ درصد بود (شکل ۱-B) که نشان می‌دهد تبدیل کود فسفر مصرفی از شکل قابل جذب به شکل یا شکل‌های غیرقابل جذب بر اثر گذشت زمان یا پیر شدن، در شرایط شور کمتر از شرایط غیرشور بود که با نتایج Zheli et al. (2020) مطابقت داشت. همچنین، مقایسه میانگین‌ها نشان داد که شور شدن خاک با نمک سدیم کلرید، غلظت فسفر قابل جذب گیاه در تیمارهای مختلف را افزایش داد هر چند که این افزایش در برخی تیمارها از نظر آماری معنادار نبود (شکل ۱-A). بخشی از این افزایش به جذب کمتر فسفر به‌وسیله گیاهان در شرایط شور مربوط است که بعد از برداشت گیاهان فسفر بیشتری در خاک باقی می‌ماند. باین‌حال، بخشی از این افزایش نیز به اثر مثبت شوری سدیم کلرید بر مقدار فسفر زیست‌فراهم خاک مربوط است. Khoshgoftarmanesh & Nourbakhsh (2009) گزارش دادند که شور کردن یک خاک غیرشور با افزودن سدیم کلرید و رساندن ECEc آن به 18.2 dS/m، سبب افزایش فسفر قابل استخراج با سدیم بی‌کربنات از خاک پس از ۸ هفته نگهداری در دمای ۲۵ درجه سلسیوس گردید. به‌نظر می‌رسد که سدیم کلرید به عنوان یک عصاره‌گیر سبب استخراج فسفر بیشتری از خاک می‌شود. همچنین، افزایش نمک به خاک سبب افزایش قدرت یونی محلول خاک و کاهش pH آن می‌شود (Chorom & Rengasamy, 1997; Van & Thanh, 2021). با افزایش قدرت یونی محلول خاک، چون ضریب فعالیت یون‌ها کاهش می‌یابد، مولکول‌های آب بیشتری تفکیک می‌شود و غلظت H^+ افزایش می‌یابد. عامل دیگری که هنگام شور شدن خاک باعث کاهش pH محلول خاک می‌شود، پدیده تبادل کاتیونی است که Na^+ های محلول خاک جایگزین H^+ های موجود در بخش تبادل شده و H^+ ها را به محلول خاک وارد می‌کند. در نتیجه، غلظت H^+ در محلول خاک افزایش و pH آن کاهش می‌یابد. کاهش pH خاک به‌ویژه در خاک‌های آهکی و قلیایی سبب افزایش حل شدن ترکیب‌های فسفر و افزایش فسفر قابل استخراج با عصاره‌گیر سدیم بی‌کربنات می‌شود (Holford, 1997). Ye et al. (2013) گزارش دادند که شوری و pH خاک از عوامل مؤثر بر فسفر قابل جذب بودند و غلظت یون‌ها در محلول خاک با تغییر pH خاک، بر فراهمی فسفر اثر داشت. Van & Thanh (2021) و Xie et al. (2022) بین شوری خاک و فسفر قابل جذب رابطه منفی مشاهده کردند به‌طوری‌که با گذشت زمان و افزایش شوری، فسفر قابل جذب گیاه در خاک کاهش یافت. این کاهش را می‌توان به افزایش جذب سطحی فسفات در شرایط شور به دلیل کاهش ضخامت لایه دوگانه پخشیده نسبت داد (Grattan & Grieve, 1999; Dey et al., 2021). همچنین، در شرایط شور، اگر غلظت یون‌های کلسیم زیاد باشد، از راه رسوب فسفر به شکل کلسیم فسفات، مقدار فسفر زیست‌فراهم خاک را کاهش می‌دهد (Van Dijk et al., 2019). Hatami et al. (2024) حاکی را با افزودن آب شوری حاوی یون‌های مختلف از قبیل کلسیم، منیزیم، بی‌کربنات، سولفات و غیره شور نموده و درصد بازیابی کود فسفر (قابل استخراج با عصاره گیر اولسن) را تعیین و مشاهده کردند که درصد بازیابی کود فسفر در سطح شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر کمتر از سطح شوری ۲ دسی‌زیمنس بر متر بود که نشانگر کاهش زیست‌فراهمی کود فسفر در شرایط شور بود. Saleh et al. (2013) گزارش دادند که افزایش شوری محلول خاک به ۸ dS/m از دو منبع سدیم کلرید و ترکیب نمک‌های سدیم کلرید + سدیم سولفات + کلسیم کلرید + منیزیم سولفات با

نسبت مولی ۴:۲:۱ مشابه شرایط خاک‌های شور و شور-سدیمی دشت تبریز موجب کاهش غلظت سیلیسیم، آهن و منگنز قابل استخراج با استیک اسید از خاک شد. باتوجه به اثر متقابل میان این عنصرها و فسفر، به نظر می‌رسد این تغییرات می‌تواند بر زیست‌فراهمی فسفر در خاک اثر داشته باشد.

تأثیر شوری، کود فسفر، نوع کشت بر مجموع فسفر قابل جذب و فسفر جذب شده به وسیله گیاه

تجزیه واریانس نشان داد که اثرهای اصلی نوع کشت، شوری و کود فسفر بر مجموع فسفر قابل جذب و فسفر جذب شده به وسیله گیاه (Olsen-P+P_{upt}) معنادار بودند. همچنین، به استثنای اثرهای متقابل کشت × شوری و کود فسفر × نوع کشت × شوری سایر اثرهای متقابل بر Olsen-P+P_{upt} معنادار بودند (جدول ۴). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در تیمارهای بدون کود فسفر، کشت مخلوط گندم - خلر در هر دو شرایط شور و غیرشور و کشت مخلوط گندم - ماشک فقط در شرایط شور، مقدار Olsen-P+P_{upt} را نسبت به خاک کشت نشده به طور معنادار افزایش دادند. همچنین، در تیمارهای با کود فسفر، مقدار Olsen-P+P_{upt} در شرایط با کشت و تمامی روش‌های کشت و در هر دو شرایط شور و غیرشور نسبت به خاک کشت نشده به طور معنادار بیشتر بود که بیانگر افزایش زیست‌فراهمی فسفر در خاک ریزوسفر بود. بیشترین مقدار Olsen-P+P_{upt} در شرایط با کود فسفر و در هر دو شرایط شور و غیرشور در کشت مخلوط گندم - ماشک به ترتیب به میزان ۳۷/۲ و ۳۳/۷ ملی‌گرم در کیلوگرم مشاهده شد (به ترتیب ۳۵۱/۵ و ۳۰۹ درصد افزایش نسبت به شاهد) که نشان می‌دهد افزایش زیست‌فراهمی فسفر در کشت مخلوط بیشتر از تک‌کشتی این گیاهان بود و دلایل آن پیش از این بحث شده است.



شکل ۲. اثر متقابل شوری، کود فسفر و نوع کشت بر مجموع فسفر قابل جذب و جذب فسفر به وسیله گیاه (Olsen-P+P_{upt}).

به طور کلی، میانگین Olsen-P+P_{upt} در شرایط شور به طور معناداری بیشتر از شرایط غیرشور بود که حاکی از افزایش زیست‌فراهمی فسفر در شوری سدیم کلرید بود. با این حال، Van Dijk et al. (2019) گزارش کردند که وقتی غلظت کلسیم در شرایط شور بیشتر بود، بر اثر رسوب فسفر به شکل کلسیم فسفات، زیست‌فراهمی فسفر در شرایط شور کاهش یافت. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که این بیشتر بودن Olsen-P+P_{upt} در شرایط شور نسبت به شرایط غیرشور، فقط در تیمارهای با کود فسفر و در شرایط بدون کشت (۱۸/۴ میلی‌گرم در کیلوگرم) و کشت مخلوط گندم - ماشک (۳۷/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) از نظر آماری معنادار بود. دلایل افزایش زیست‌فراهمی فسفر در خاک در شرایط شوری سدیم کلرید در قسمت قبل بحث شد. همچنین، به نظر می‌رسد این افزایش به تثبیت کمتر کود فسفر در شرایط شور مربوط است. مصرف کود فسفر مقدار Olsen-P+P_{upt} را در هر دو شرایط شور و غیرشور و با کشت و بدون کشت به طور معنادار افزایش داد (شکل ۲) که یک نتیجه مورد انتظار بود. افزایش فسفر قابل جذب گیاه در خاک پس از مصرف کود فسفر به وسیله Najafi & Towfighi (2012)، Mardomi et al. (2019) و Azimzadeh et al. (2020) نیز گزارش شده است.

تأثیر شوری، کود فسفر، نوع کشت و گذشت زمان بر غلظت فسفر به سهولت محلول در خاک

تجزیه واریانس نشان داد که اثرهای اصلی نوع کشت، شوری، کود فسفر و زمان بر فسفر به سهولت محلول (NH₄Cl-P) خاک معنادار بودند. همچنین، به استثنای اثرهای متقابل کود فسفر × شوری و زمان × کود فسفر × شوری، سایر اثرهای متقابل بر NH₄Cl-P معنادار بودند (جدول‌های ۳ و ۴). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در تیمارهای بدون کود فسفر و در شرایط غیرشور، تک‌کشتی و کشت مخلوط هر سه گیاه مورد مطالعه، مقدار NH₄Cl-P را نسبت به خاک کشت نشده به طور معنادار کاهش داد. این کاهش را می‌توان به جذب NH₄Cl-P به وسیله گیاهان مورد مطالعه نسبت داد. همچنین، در این شرایط، خاک توان جایگزین کردن مجدد این شکل فسفر را نداشت.



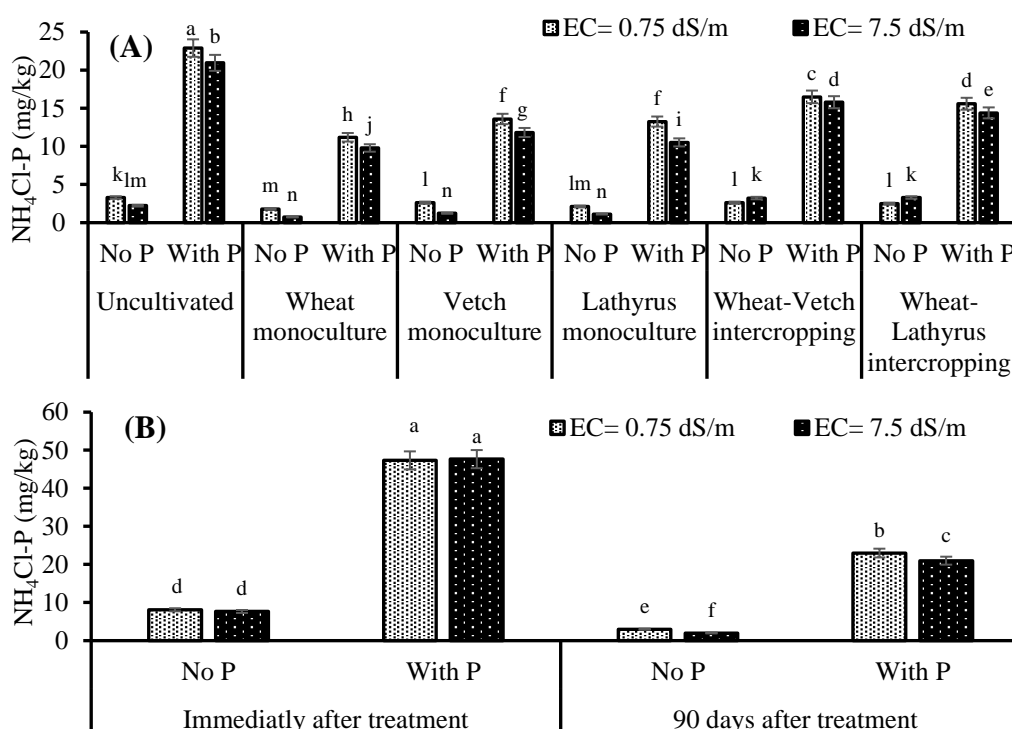
و در نتیجه، تخلیه این شکل فسفر از خاک رخ داد. (Najafi & Towfighi (2006 & 2012) گزارش کردند که در شرایط با و بدون کود فسفر، مقدار $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ در برخی خاک‌های مورد مطالعه در ریزوسفر برنج بر اثر جذب آن به‌وسیله ریشه گیاه کمتر از خاک توده بود اما در برخی خاک‌ها با خاک توده تفاوت معنادار نداشت. $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ ، از منابع قابل جذب گیاهان در خاک است. عدم تفاوت معنادار مقدار $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ در شرایط با کشت و بدون کشت به توان بافری فسفر این خاک‌ها مربوط بود که هم‌زمان با جذب فسفر از این منبع، خاک مجدد آن را پر می‌کند و در نتیجه میان دو تیمار با کشت و بدون کشت از نظر این شکل فسفر تفاوت مشاهده نمی‌شود. در واقع، فسفات موجود در سایر شکل‌ها در طول دوره رشد گیاهان به این شکل تبدیل و به‌وسیله ریشه گیاهان جذب می‌شود. چون سرعت جذب به‌وسیله ریشه گیاهان تقریباً با سرعت پر شدن مجدد $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ برابر است، غلظت $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ تغییر معناداری نسبت به بدون کشت نمی‌کند. در تیمارهای بدون کود فسفر و در شرایط شور، تک‌کشتی هر سه گیاه گندم، خلر و ماشک، مقدار $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ را نسبت به خاک کشت نشده به‌طور معنادار کاهش (به ترتیب ۶۷/۲، ۴۹/۲ و ۴۴/۸ درصد) و کشت مخلوط خلر و ماشک مقدار $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ را نسبت به خاک توده یا کشت نشده به‌طور معنادار افزایش داد (به ترتیب ۴۷/۹ و ۴۴/۸ درصد) که با یافته‌های (Sun et al. (2019) مطابقت داشت. مقدار $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ در تک‌کشتی ماشک بیشتر از تک‌کشتی گندم بود. افزایش $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ در خاک ریزوسفر روش‌های کشت مخلوط را می‌توان به اصلاح خاک ریزوسفر بر اثر تراوهای متفاوت ریشه دو گیاه از قبیل اسیدهای آلی، پروتون، کربوهیدرات‌ها، سیدروفورها و غیره نسبت داد. همچنین، جذب بیشتر کاتیون‌ها نسبت به آنیون‌ها در فرایند تثبیت نیتروژن در گیاهان لگوم، باعث آزادسازی پروتون از ریشه و در نتیجه اسیدی شدن ریزوسفر و افزایش زیست‌فراهمی فسفر می‌شود (Marschner, 2012; Bouray et al., 2021). (Chen et al. (2002) گزارش دادند که کشت گیاه چاودار سبب تخلیه فسفر معدنی به‌سهولت قابل استخراج خاک و کاهش غلظت آن شد. (Singh et al. (2000) گزارش کردند که کشت گیاه در تناوب گندم - برنج، شکل‌های فسفر معدنی در خاک را به‌طور معنادار تغییر داد. در تیمارهای با کود فسفر، مقدار $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ در شرایط با کشت و تمامی روش‌های کشت و در هر دو شرایط شور و غیرشور نسبت به خاک کشت نشده به‌طور معنادار کمتر بود. به‌طور کلی، میانگین $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ در شرایط شور به‌طور معناداری کمتر از شرایط غیرشور بود. با این حال، مقایسه میانگین‌ها نشان داد که اثر شوری بر مقدار $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ بسته به سطح فسفر و نوع کشت متفاوت بود به‌طوری‌که در تیمارهای بدون کود فسفر و در شرایط کشت مخلوط گندم - خلر و گندم - ماشک، شوری سدیم کلرید مقدار $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ را نسبت به شرایط غیرشور نسبت به شاهد به‌طور معنادار افزایش داد (به ترتیب ۳۲ و ۲۲/۸ درصد) در حالی که در سایر شرایط، شوری سدیم کلرید مقدار $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ را نسبت به شرایط غیرشور به‌طور معنادار کاهش داد. (Nasrin et al. (2016) نشان دادند که شور شدن خاک، تبدیل کانی‌های ثانویه به فسفر قابل جذب را کاهش داد. مصرف کود فسفر مقدار $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ را در هر دو شرایط شور و غیرشور، با کشت و بدون کشت و هر دو زمان صفر و ۹۰ روز به‌طور معنادار افزایش داد (شکل ۳-A و B) که نشان می‌دهد ۹۰ روز پس از مصرف کود فسفر در این خاک با بافت شن لومی، حدود ۱۷ درصد از آن به شکل $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ باقی می‌ماند و حدود ۸۳ درصد از کود مصرف‌شده به شکل‌های دیگر فسفر در خاک تبدیل می‌شود.

مقایسه میانگین‌ها نشان داد که با گذشت ۹۰ روز پس از مصرف کود فسفر در خاک (مسن شدن) در هر دو شرایط شور و غیرشور، مقدار $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ به‌طور معنادار کاهش یافت که ناشی از تبدیل این شکل به شکل‌های دیگر فسفر است. بیشترین مقدار $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ بلافاصله پس از مصرف کود فسفر در خاک و در هر دو شرایط شور و غیرشور مشاهده شد (به ترتیب ۴۷۲/۱۴ و ۴۶۸/۱۸ درصد افزایش نسبت به شاهد). بلافاصله پس از مصرف کود در خاک، بین دو سطح شوری تفاوت معنادار وجود نداشت اما ۹۰ روز پس از مصرف کود فسفر در خاک کشت نشده، بیشترین مقدار $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ به میزان ۲۳ میلی‌گرم در کیلوگرم در شرایط با کود فسفر و غیرشور مشاهده شد و شوری سدیم کلرید در هر دو شرایط با و بدون کود فسفر مقدار $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ را کاهش داد (شکل ۳-B). این نتایج نشان می‌دهد که اثر شوری بر مقدار $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ به زمان بستگی دارد و با گذشت زمان، شوری سبب تثبیت فسفر در خاک به‌ویژه از راه کاهش ضخامت لایه دوگانه پخشیده و افزایش جذب سطحی فسفر می‌شود (Grattan & Grieve, 1999; Dey et al., 2021). (Barrow & Ellis (1986) گزارش کردند که جذب سطحی فسفات به‌وسیله خاک، با افزایش سطح شوری سدیم کلرید در pH قلیایی افزایش و در pH اسیدی کاهش یافت.

تأثیر شوری، کود فسفر، نوع کشت و گذشت زمان بر غلظت آلومینیم فسفات در خاک

تجزیه و آریانس نشان داد که اثرهای اصلی نوع کشت، شوری، کود فسفر و زمان و تمامی اثرهای متقابل آن‌ها بر غلظت فسفر به شکل آلومینیم فسفات ($\text{NH}_4\text{F-P}$) خاک معنادار بودند (جدول‌های ۴ و ۵). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در تیمارهای با و بدون کود فسفر و در هر دو شرایط شور و غیرشور، تک‌کشتی و کشت مخلوط هر سه گیاه گندم، خلر و ماشک، مقدار $\text{NH}_4\text{F-P}$ را نسبت به خاک کشت

نشده به‌طور معنادار کاهش دادند به استثنای کشت مخلوط گندم - خلر در شرایط شور که با تیمار بدون کشت تفاوت معنادار نداشت. این نتایج نشان داد که آلومینیم فسفات یکی از منابع فسفر قابل جذب هر سه گیاه مورد مطالعه بود که با نتایج (Najafi & Towfighi 2006) و (2012) و (Safari Sinegani & Rashidi 2011) مطابقت داشت. Yan et al. (2020) گزارش کردند که آلومینیم فسفات (NH_4F) از منابع قابل جذب فسفر به‌وسیله گیاهان و ریزجانداران در خاک محسوب می‌شود. به همین دلیل، بین مقدار آلومینیم فسفات خاک و رشد گیاه همبستگی بالایی مشاهده شده‌است (Martinez & Lauchli, 1994). Chang & Juo (1963) گزارش دادند که فسفر قابل جذب عمدتاً از آلومینیم فسفات و آهن فسفات تشکیل یافته‌است. آنان فراهمی زیاد فسفر از منابع آهن فسفات و آلومینیم فسفات را نسبت به کلسیم فسفات‌ها به سطح ویژه زیاد این ترکیب‌ها نسبت دادند. دو ترکیب آهن فسفات و آلومینیم فسفات در بخش رس خاک و کلسیم فسفات در بخش سیلت خاک، غلظت بیشتری داشتند.

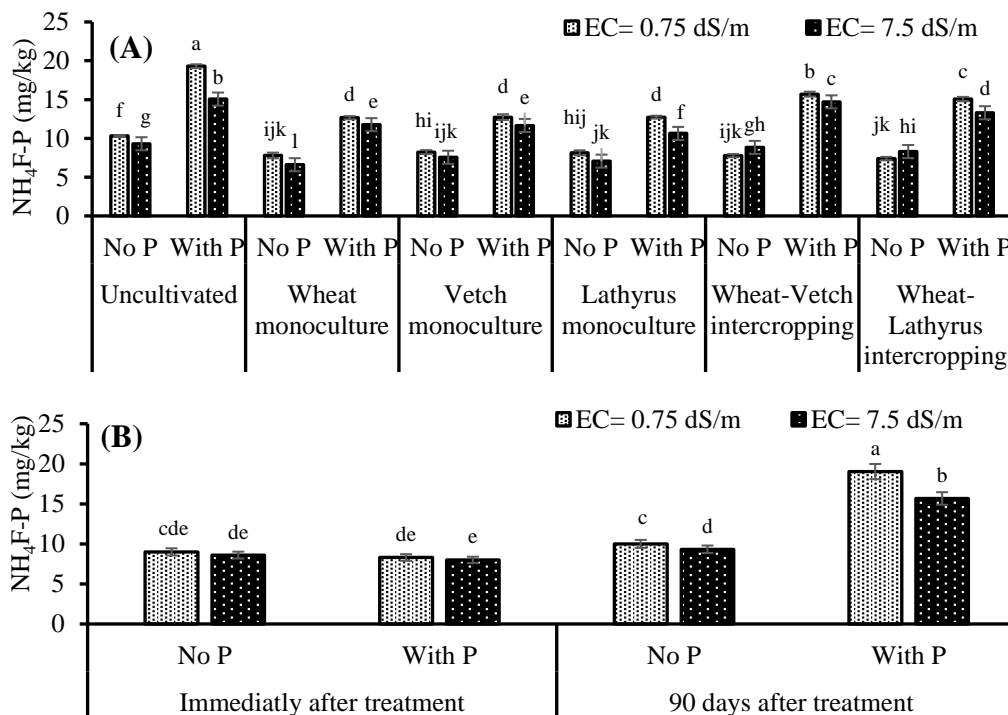
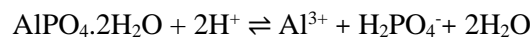


شکل ۳. اثر متقابل شوری، کود فسفر و نوع کشت (A) و اثر متقابل شوری، کود فسفر و زمان (B) بر فسفر به‌سهولت محلول ($\text{NH}_4\text{Cl-P}$)

مقایسه میانگین‌ها نشان داد که میان روش‌های کشت مختلف (تک‌کشتی و کشت مخلوط) از نظر مقدار $\text{NH}_4\text{F-P}$ در شرایط با و بدون کود فسفر و در هر دو شرایط شور و غیرشور، تفاوت معنادار وجود داشت. در شرایط با کود فسفر و شور، کشت مخلوط گندم - خلر و گندم - ماشک مقدار $\text{NH}_4\text{F-P}$ را نسبت به تک‌کشتی این سه گیاه (به ترتیب ۴۱/۶ و ۳۴/۶ درصد) و در شرایط بدون کود فسفر و شور، کشت مخلوط گندم - خلر و گندم - ماشک نسبت به تک‌کشتی آن‌ها (به ترتیب ۱۷/۵ و ۱۶/۵ درصد) افزایش دادند (شکل ۴-A). این افزایش را می‌توان به اصلاح خاک ریزوسفر در کشت مخلوط نسبت داد (Marschner, 2012) و از مزیت‌های کشت مخلوط نسبت به تک‌کشتی محسوب می‌شود و باعث می‌شود گیاهان در کشت مخلوط بتوانند از منابع بومی خاک بهتر استفاده نمایند و نیاز به مصرف کود شیمیایی فسفر کاهش یابد. Reichard et al. (2007) و Wang et al. (2014) مشاهده کردند که در کشت مخلوط ذرت - باقلا، فیتوسیدروفورها و فنولیک اسیدهایی که به مقدار زیاد در تراوهای ریشه ذرت و باقلا وجود دارند، می‌توانند آلومینیم اکسیدها و آلومینیم فسفات را حل و فسفر معدنی همراه آن‌ها را آزاد کنند. در نتیجه، غلظت $\text{NH}_4\text{F-P}$ افزایش می‌یابد و به‌وسیله ریشه هر دو گیاه جذب می‌شود.

مقایسه میانگین‌ها نشان داد که اثر شوری سدیم کلرید بر مقدار $\text{NH}_4\text{F-P}$ بسته به سطح فسفر، زمان پس از مصرف فسفر و نوع کشت متفاوت بود به‌طوری‌که در تیمارهای بدون کود فسفر و در شرایط کشت مخلوط گندم - خلر و گندم - ماشک، شوری سدیم کلرید مقدار $\text{NH}_4\text{F-P}$ را نسبت به شرایط غیرشور به ترتیب ۱۲/۲ و ۱۳/۶ درصد افزایش داد درحالی‌که در سایر شرایط، شوری سدیم کلرید مقدار

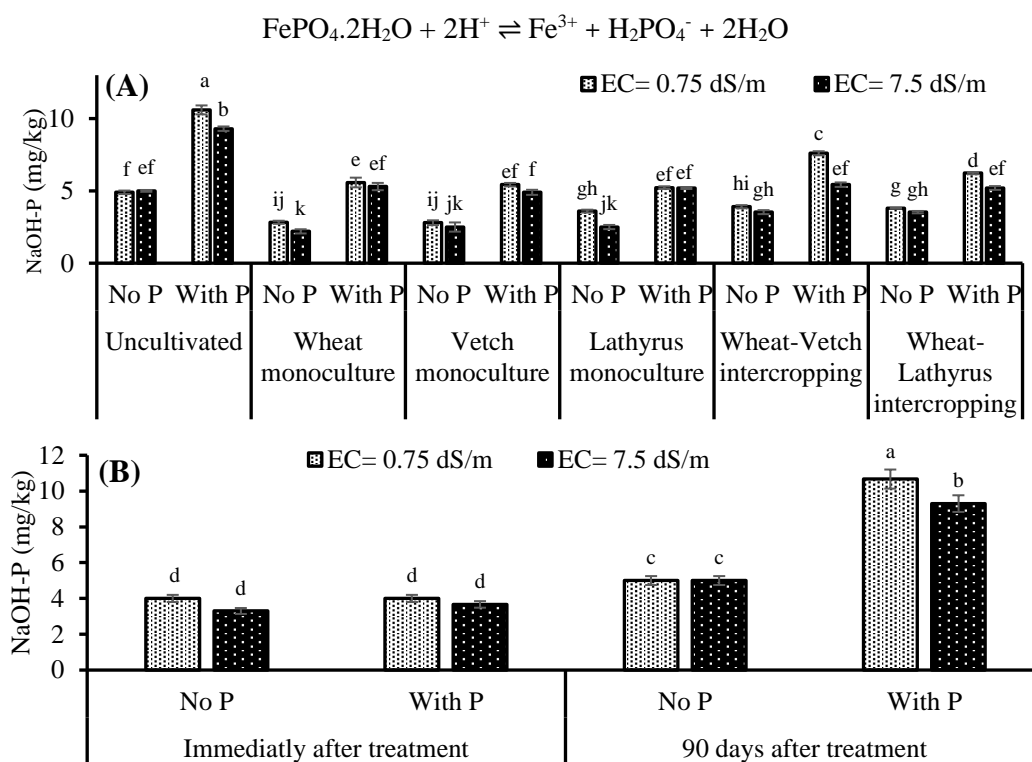
$\text{NH}_4\text{F-P}$ را نسبت به شرایط غیرشور به‌طور معنادار کاهش داد (شکل ۴-ا). شوری سدیم کلرید بر مقدار $\text{NH}_4\text{F-P}$ در زمان صفر در خاک کشت نشده اثر معنادار نداشت اما پس از ۹۰ روز خوابانیدن در هر دو شرایط با و بدون مصرف کود فسفر، مقدار $\text{NH}_4\text{F-P}$ را به‌طور معنادار کاهش داد که با نتایج Zheli et al. (2020) مطابقت داشت. مصرف کود فسفر مقدار $\text{NH}_4\text{F-P}$ را در هر دو شرایط شور و غیرشور و هر دو شرایط با کشت و بدون کشت به‌طور معنادار افزایش داد. بلافاصله پس از مصرف کود فسفر، میان دو سطح با و بدون کود فسفر، از نظر مقدار $\text{NH}_4\text{F-P}$ تفاوت معنادار مشاهده نشد که نشان می‌دهد بلافاصله پس از مصرف کود فسفر، این کود در شکل آلومینیم فسفات وارد نشد اما پس از ۹۰ روز خوابانیدن، کود فسفر به شکل آلومینیم فسفات تبدیل شد و مقدار $\text{NH}_4\text{F-P}$ نسبت به تیمار بدون کود فسفر (۹۳/۳ درصد) به‌طور معنادار افزایش یافت که با نتایج Wright (2009) و Najafi & Towfighi (2013) مطابقت داشت. بیشترین مقدار $\text{NH}_4\text{F-P}$ (۱۹/۳ میلی‌گرم در کیلوگرم)، ۹۰ روز پس از مصرف کود فسفر در خاک و در شرایط غیرشور مشاهده شد (شکل ۴-ب). کود فسفر مصرف شده در خاک بسته به نوع خاک، مقدار کود و زمان می‌تواند به شکل‌های مختلف تبدیل شود. ریزجانداران خاک به‌ویژه باکتری‌ها نیز از منابع مختلف فسفر استفاده می‌کنند و نقش زیادی در این دگرگونی‌ها دارند (Piegholdt et al., 2013). نتایج ما نشان داد که در شرایط بدون کشت، ۹۰ روز پس از مصرف کود فسفر در خاک، در شرایط شور و غیرشور به‌ترتیب حدود ۷/۸ و ۱۱/۳ درصد از آن به شکل $\text{NH}_4\text{F-P}$ تبدیل شد. به‌عبارت‌دیگر، شوری سدیم کلرید تبدیل کود فسفر به $\text{NH}_4\text{F-P}$ را کاهش داد. به نظر می‌رسد که دلیل این کاهش را اینگونه می‌توان توضیح داد که با افزایش شوری سدیم کلرید و افزایش قدرت یونی محلول خاک، ضریب فعالیت یون‌های Al^{3+} و H_2PO_4^- کاهش می‌یابد و سبب حل شدن آلومینیم فسفات در خاک طبق تعادل زیر می‌شود (Lindsay, 1979). همچنین، واکنش زیر نشان می‌دهد که با کاهش pH محلول خاک در شرایط شوری سدیم کلرید (Van & Thanh, 2021)، حل‌پذیری آلومینیم فسفات زیاد می‌شود. در نتیجه، غلظت $\text{NH}_4\text{F-P}$ در شرایط شوری سدیم کلرید کم می‌شود.



شکل ۴. اثر متقابل شوری، کود فسفر و نوع کشت (A) و اثر متقابل شوری، کود فسفر و زمان (B) بر آلومینیم فسفات ($\text{NH}_4\text{F-P}$)

تأثیر شوری، کود فسفر، نوع کشت و گذشت زمان بر غلظت آهن فسفات در خاک تجزیه واریانس نشان داد که اثرهای اصلی نوع کشت، شوری، کود فسفر و زمان و تمامی اثرهای متقابل آن‌ها به استثنای اثرهای متقابل کشت × شوری و زمان × شوری بر غلظت فسفر به شکل آهن فسفات (NaOH-P) در خاک معنادار بودند (جدول‌های ۳ و ۴). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در تیمارهای با و بدون کود فسفر و در هر دو شرایط شور و غیرشور، تک‌کشتی و کشت مخلوط هر سه گیاه گندم،

خلر و ماشک، غلظت NaOH-P را نسبت به خاک کشت نشده به‌طور معنادار کاهش دادند که نشان می‌دهد آهن فسفات یکی از منابع فسفر قابل جذب گیاهان در خاک بود که با نتایج سایر پژوهشگران پس از کشت گیاهان مختلف مطابقت داشت (Najafi & Towfighi, 2012; Safari Sinegani & Rashidi, 2011; Boschetti et al., 2009; 2006). همچنین، میان روش‌های کشت مختلف (تک‌کشتی و کشت مخلوط) از نظر غلظت NaOH-P در شرایط با و بدون کود فسفر و در هر دو شرایط شور و غیرشور، تفاوت معنادار وجود داشت که می‌تواند ناشی از جذب متفاوت فسفر به‌وسیله گیاهان و متفاوت بودن فرایندهای ریزوسفر آن‌ها باشد. در شرایط با کود فسفر و غیرشور، کشت مخلوط گندم - ماشک و گندم - خلر نسبت به تک‌کشتی این سه گیاه، غلظت NaOH-P را به‌طور معنادار افزایش دادند (به ترتیب ۲۲۴/۱ و ۱۸/۵ درصد) که این نتیجه مزیت کشت مخلوط به تک‌کشتی را نشان می‌دهد و باعث افزایش زیست‌فراهمی فسفر در خاک و کاهش مصرف کود شیمیایی فسفر می‌شود. در شرایط بدون کود فسفر و در هر دو شرایط شور و غیرشور، کشت مخلوط گندم - ماشک و گندم - خلر نسبت به تک‌کشتی گندم و ماشک، مقدار NaOH-P را به‌طور معنادار افزایش دادند (شکل ۵- A) که به نظر می‌رسد ناشی از اصلاح خاک ریزوسفر و افزایش زیست‌فراهمی فسفر در کشت مخلوط نسبت به تک‌کشتی است (Marschner, 2012). Reichard et al. (2007) و Wang et al. (2014) مشاهده کردند که در کشت مخلوط ذرت - باقلا، افزایش غلظت فیتوسیدروفورها و فنولیک اسیدها، می‌تواند آهن اکسیدها و آهن فسفات‌ها را حل و فسفر معدنی همراه آن‌ها را آزاد کند. در نتیجه، غلظت NaOH-P افزایش می‌یابد و می‌تواند به‌وسیله ریشه گیاهان از خاک جذب شود.



شکل ۵. اثر متقابل شوری، کود فسفر و نوع کشت (A) و اثر متقابل شوری، کود فسفر و زمان (B) بر آهن فسفات (NaOH-P)

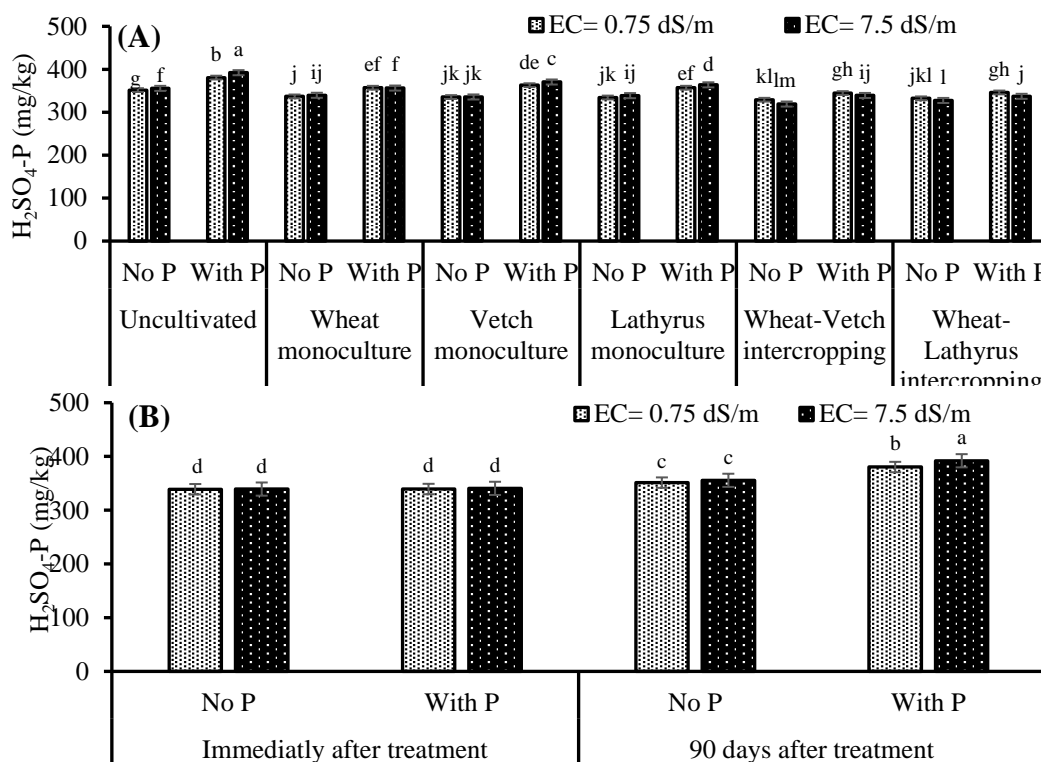
مقایسه میانگین‌ها نشان داد که به‌طور کلی، میانگین غلظت NaOH-P در شرایط شوری سدیم کلرید نسبت به غیرشور به‌طور معنادار کمتر بود. باین‌حال، اثر شوری سدیم کلرید بر غلظت NaOH-P بسته به سطح فسفر، زمان پس از مصرف فسفر و نوع کشت متفاوت بود به‌طوری‌که شوری سدیم کلرید در تیمارهای بدون کود فسفر و در شرایط تک‌کشتی گندم و خلر نسبت به شرایط غیرشور، غلظت NaOH-P را به‌طور معنادار کاهش داد درحالی‌که در سایر شرایط، شوری سدیم کلرید بر غلظت NaOH-P اثر معنادار نداشت (شکل ۵- A). شوری سدیم کلرید بر غلظت NaOH-P در زمان صفر در خاک کشت نشده اثر معنادار نداشت اما پس از ۹۰ روز خوابانیدن در شرایط با کود فسفر، غلظت NaOH-P را به‌طور معنادار کاهش داد که با نتایج Zheli et al. (2020) مطابقت داشت. مصرف کود فسفر

غلظت NaOH-P را در هر دو شرایط شور و غیرشور و هر دو شرایط با کشت و بدون کشت به‌طور معنادار افزایش داد. بلافاصله پس از مصرف کود فسفر، میان دو سطح با و بدون کود فسفر، از نظر غلظت NaOH-P تفاوت معنادار مشاهده نشد که نشان می‌دهد بلافاصله پس از مصرف کود فسفر، این کود در شکل آهن فسفات وارد نشد اما پس از ۹۰ روز خوابانیدن، کود فسفر به شکل آهن فسفات تبدیل شد و غلظت NaOH-P نسبت به بدون کود فسفر در هر دو شرایط شور و غیرشور افزایش یافت (به ترتیب ۸۶ و ۱۱۳/۴ درصد). تبدیل کود فسفر به شکل آهن فسفات به‌وسیله Wright (2009) و Najafi & Towfighi (2013) نیز گزارش شده‌است. بیشترین غلظت NaOH-P به میزان ۱۰/۷ میلی‌گرم در کیلوگرم، ۹۰ روز پس از مصرف کود فسفر در خاک و در شرایط غیرشور مشاهده شد (شکل ۵-B). کاهش غلظت NaOH-P در شرایط شوری سدیم کلرید را اینگونه می‌توان توضیح داد که با افزایش شوری سدیم کلرید و افزایش قدرت یونی محلول خاک، ضریب فعالیت یون‌های Fe^{3+} و $H_2PO_4^-$ کاهش می‌یابد و سبب حل شدن آهن فسفات در خاک طبق تعادل زیر می‌شود (Lindsay, 1979). همچنین، واکنش زیر نشان می‌دهد که با کاهش pH محلول خاک در شرایط شوری سدیم کلرید (Van & Thanh, 2021)، حل‌پذیری آهن فسفات زیاد می‌شود. در نتیجه، غلظت NOH-P در شرایط شوری سدیم کلرید کم می‌شود.

تأثیر شوری، کود فسفر، نوع کشت و گذشت زمان بر غلظت فسفر به شکل آپاتیت در خاک

تجزیه واریانس نشان داد که اثرهای اصلی نوع کشت، کود فسفر و زمان بر غلظت فسفر به شکل آپاتیت (H_2SO_4 -P) معنادار بود اما اثر اصلی شوری معنادار نبود. به استثنای اثرهای متقابل کود فسفر × شوری و زمان × شوری سایر اثرهای متقابل عامل‌های مورد مطالعه بر غلظت H_2SO_4 -P معنادار بودند (جدول‌های ۴ و ۵). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در تیمارهای با و بدون کود فسفر و در هر دو شرایط شور و غیرشور، تک‌کشتی و کشت مخلوط هر سه گیاه گندم، خلر و ماشک، غلظت H_2SO_4 -P را نسبت به خاک کشت نشده به‌طور معنادار کاهش دادند که نشان می‌دهد آپاتیت یکی از منابع فسفر قابل جذب گیاهان در خاک مورد مطالعه بود که با نتایج سایر پژوهشگران پس از کشت گیاهان مختلف مطابقت داشت (Najafi & Towfighi, 2006; Boschetti et al., 2009; Safari Sinangani & Rashidi, 2011; Najafi & Towfighi, 2012). همچنین، میان روش‌های کشت مختلف (تک‌کشتی و کشت مخلوط) از نظر غلظت H_2SO_4 -P در شرایط با و بدون کود فسفر و در هر دو شرایط شور و غیرشور، تفاوت معنادار وجود داشت. در شرایط با و بدون کود فسفر و شور، کشت مخلوط گندم - ماشک و گندم - خلر نسبت به تک‌کشتی گندم، خلر و ماشک، غلظت H_2SO_4 -P را به‌طور معنادار کاهش دادند که به نظر می‌رسد به اصلاح خاک ریزوسفر و افزایش حل‌پذیری آپاتیت در کشت مخلوط و جذب بیشتر فسفر به‌وسیله دو گیاه در کشت مخلوط مربوط باشد. این نتیجه نیز نشان می‌دهد کشت مخلوط سبب استفاده از منابع فسفر بومی خود خاک می‌شود و می‌تواند مقدار کود شیمیایی فسفر مورد نیاز را کاهش دهد. در شرایط با کود فسفر و در هر دو شرایط شور و غیرشور، غلظت H_2SO_4 -P در تک‌کشتی ماشک از تک‌کشتی گندم به ترتیب و خلر بیشتر بود (شکل ۶-A) که می‌تواند به متفاوت بودن ترکیب شیمیایی تراوه‌های آن‌ها و متفاوت بودن فرایندهای ریزوسفر در این گیاهان مربوط باشد (Pearse et al., 2006; Li et al., 2010; Marschner, 2012). گزارش کردند که ترکیب کربوکسیلات‌ها و جامعه میکروبی ریزوسفر در کشت مخلوط با تک‌کشتی متفاوت بود که می‌تواند بر جذب فسفر به‌وسیله ریشه گیاهان اثر داشته باشد.

مقایسه میانگین‌ها نشان داد که به‌طور کلی، میانگین غلظت H_2SO_4 -P در شرایط شوری سدیم کلرید تفاوت معناداری با شرایط غیرشور نداشت. با این حال، اثر شوری سدیم کلرید بر غلظت H_2SO_4 -P بسته به سطح فسفر، زمان پس از مصرف فسفر و نوع کشت متفاوت بود به‌طوری‌که شوری سدیم کلرید، غلظت H_2SO_4 -P را در برخی تیمارها به‌طور معنادار افزایش و در برخی تیمارها به‌طور معنادار کاهش داد (شکل ۶-A). شوری سدیم کلرید پس از ۹۰ روز خوابانیدن در شرایط با کود فسفر، غلظت H_2SO_4 -P را نسبت به شرایط بدون کود به‌طور معنادار افزایش داد (۱۱/۶ درصد). مصرف کود فسفر غلظت H_2SO_4 -P را در هر دو شرایط شور و غیرشور و هر دو شرایط با کشت و بدون کشت به‌طور معنادار افزایش داد. بلافاصله پس از مصرف کود فسفر، میان دو سطح با و بدون کود فسفر، از نظر غلظت H_2SO_4 -P تفاوت معنادار مشاهده نشد که نشان می‌دهد بلافاصله پس از مصرف کود فسفر، این کود در شکل آپاتیت وارد نشد اما پس از ۹۰ روز خوابانیدن، کود فسفر به شکل آپاتیت تبدیل شد و غلظت H_2SO_4 -P نسبت به بدون کود فسفر در هر دو شرایط شور و غیرشور به‌طور معنادار افزایش یافت. بیشترین غلظت H_2SO_4 -P (۳۹۲ میلی‌گرم در کیلوگرم)، ۹۰ روز پس از مصرف کود فسفر در خاک و در شرایط شور مشاهده شد (شکل ۶-B).



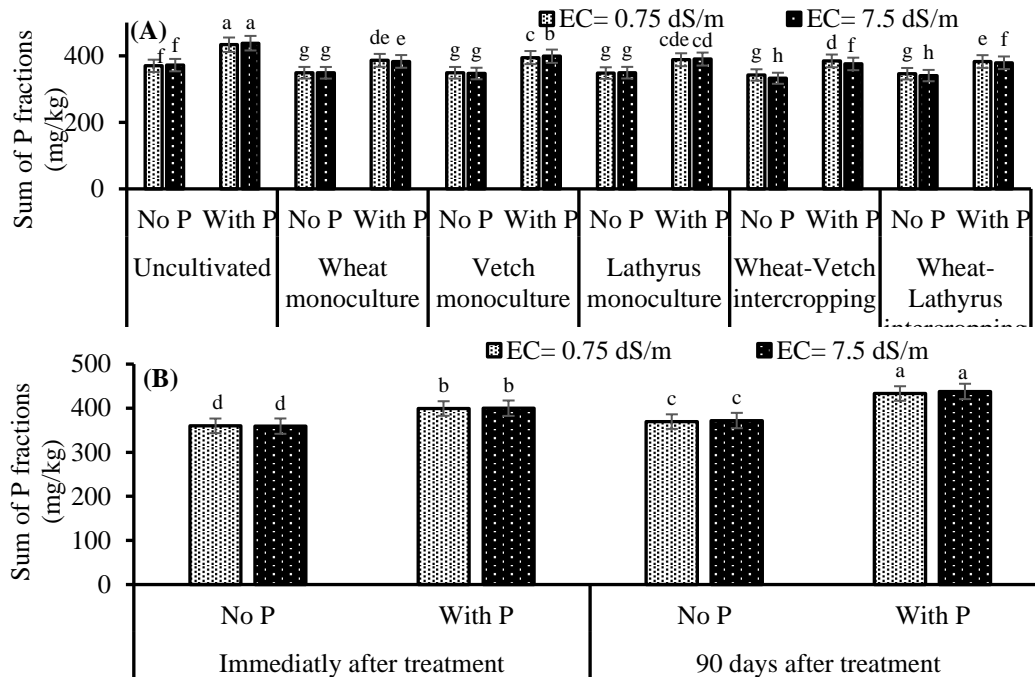
شکل ۶. اثر متقابل شوری، کود فسفر و نوع کشت (A) و اثر متقابل شوری، کود فسفر و زمان (B) بر غلظت فسفر به شکل آباتیت (H_2SO_4-P)

Akhtar & Alam (2001) گزارش کردند که زیست‌فراهمی فسفر با گذشت زمان پس از مصرف کود شیمیایی کاهش یافت و کود فسفر مصرف شده با گذشت زمان به شکل H_2SO_4-P تبدیل شد. واکنش فسفر آلی و معدنی آزاد شده با سطوح رس و تبادل لیگاندی یا کمپلکس شدن در سطح می‌تواند باعث افزایش غلظت H_2SO_4-P شود که ممکن است بر اثر جایگزینی آلومینیم با کلسیم در مکان‌های تبادل و تثبیت فسفر به وسیله کلسیم رخ دهد (Penn & Camberato, 2019). افزایش غلظت H_2SO_4-P با گذشت زمان پس از مصرف کود فسفر در خاک به وسیله سایر پژوهشگران نیز گزارش شده است (Azadi et al., 2015; Najafi & Towfighi, 2013). مقایسه مقدار فسفر در شکل‌های مختلف نشان داد که کلسیم فسفات‌ها بیشترین مقدار را داشتند که با نتایج سایر پژوهشگران مطابقت داشت (Najafi & Towfighi, 2013; Azadi et al., 2015; Hatami et al., 2024).

تأثیر شوری، کود فسفر، نوع کشت و گذشت زمان بر مجموع شکل‌های فسفر معدنی در خاک

تجزیه واریانس نشان داد که در آزمایش اول، اثرهای اصلی شوری، نوع کشت و کود فسفر و اثرهای متقابل آن‌ها به استثنای اثرهای متقابل کود فسفر × شوری و فسفر × کشت × شوری بر مجموع شکل‌های فسفر معدنی معنادار بودند (جدول ۴). در آزمایش دوم، اثرهای اصلی زمان و کود فسفر و اثر متقابل زمان × کود فسفر بر مجموع شکل‌های فسفر معدنی معنادار و اثر اصلی شوری و سایر اثرهای متقابل غیرمعنادار بودند (جدول ۵). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در تیمارهای با و بدون کود فسفر و در هر دو شرایط شور و غیرشور، تک‌کشتی و کشت مخلوط هر سه گیاه گندم، خلر و ماشک، مجموع شکل‌های فسفر معدنی را نسبت به خاک کشت نشده به‌طور معنادار کاهش دادند. همچنین، در شرایط با و بدون کود فسفر و شور، کشت مخلوط گندم - ماشک به ترتیب ۵/۹ و ۳/۵ درصد و گندم - خلر به ترتیب ۲/۷ و ۱/۹ درصد نسبت به تک‌کشتی هر یک از این سه گیاه، مجموع شکل‌های فسفر معدنی را به‌طور معنادار کاهش دادند. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که شوری سدیم کلرید، در شرایط با کود مجموع شکل‌های فسفر معدنی را در کشت مخلوط به‌طور معنادار کاهش و در تک‌کشتی ماشک ۱۴/۲ درصد نسبت به شاهد به‌طور معنادار افزایش داد. در سایر شرایط میان دو سطح شوری از نظر مجموع شکل‌های فسفر معدنی تفاوت معنادار وجود نداشت (شکل ۷-A). در آزمایش دوم که در شرایط بدون کشت انجام شد، میان دو سطح شوری سدیم کلرید از نظر مجموع شکل‌های فسفر معدنی در دو زمان مختلف و در شرایط با و بدون کود فسفر تفاوت معنادار مشاهده نشد (شکل ۷-B). در آزمایش اول، مصرف کود فسفر مجموع شکل‌های فسفر معدنی را در هر دو شرایط شور و غیرشور و هر دو شرایط با کشت و بدون کشت به‌طور معنادار افزایش داد (شکل ۷-A). در آزمایش دوم نیز مجموع شکل‌های فسفر معدنی با مصرف کود فسفر در هر دو شرایط

شور و غیرشور و هر دو زمان صفر و ۹۰ روز، به‌طور معنادار افزایش یافت (شکل ۷-B).



شکل ۷. اثر متقابل شوری، کود فسفر و نوع کشت (A) و اثر متقابل شوری، کود فسفر و زمان (B) بر مجموع شکل‌های فسفر معدنی.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که شور شدن خاک شن لومی مورد مطالعه با نمک سدیم کلرید، در شرایط بدون کشت و بدون کود فسفر، بر فسفر قابل جذب و تمامی شکل‌های فسفر معدنی اثر معنادار نداشت اما در شرایط بدون کشت و ۹۰ روز پس از مصرف کود فسفر در خاک، مقدار فسفر به‌سهولت محلول، آلومینیم فسفات و آهن فسفات را کاهش و فسفر قابل جذب و آپاتیت را افزایش داد. کود فسفر مصرف شده در خاک شن لومی مورد مطالعه با گذشت زمان به فسفر به‌سهولت محلول، آلومینیم فسفات، آهن فسفات و آپاتیت تبدیل شد. با گذشت زمان فسفر از شکل‌های با حل‌پذیری بیشتر (مانند فسفر قابل استخراج با آمونیوم کلرید) به شکل‌های با حل‌پذیری کمتر (مانند آپاتیت) تبدیل شد. کشت گیاهان گندم، خلر و ماشک در هر دو روش تک‌کشتی و کشت مخلوط، مقدار فسفر قابل جذب را نسبت به شرایط بدون کشت کاهش داد. با این حال، در شرایط با کود فسفر، مجموع Olsen-P و فسفر جذب‌شده به‌وسیله گیاهان (Olsen-P+Puptake) در شرایط با کشت بیشتر از بدون کشت بود که نشانگر افزایش زیست‌فراهمی فسفر در خاک ریزوسفر این گیاهان بر اثر کاهش pH و ترشح اسیدهای آلی، ترکیب‌های فنلی، آمینواسیدها و غیره بود. این نتایج نشان داد که در شرایط با کود فسفر، عصاره‌گیر اولسن ممکن است مقدار فسفر قابل جذب گیاهان گندم، خلر و ماشک را در خاک مورد مطالعه کمتر از مقدار واقعی برآورد نماید. همچنین، در شرایط با کود فسفر، مقدار Olsen-P+Puptake در کشت مخلوط گندم - ماشک و گندم - خلر بیشتر از تک‌کشتی این سه گیاه بود که نشانگر افزایش زیست‌فراهمی فسفر در خاک در کشت مخلوط نسبت به تک‌کشتی بود. این برتری کشت مخلوط به تراوه‌های متفاوت ریشه دو گیاه (از نظر اسیدهای آلی، ترکیب‌های فنلی، آمینواسیدها و غیره) و مخلوط شدن این تراوه‌ها مربوط است که سبب اصلاح خاک ریزوسفر و افزایش زیست‌فراهمی فسفر می‌شود. در واقع در کشت مخلوط، تراوه‌های ریشه دو گیاه نواقص هم را برطرف می‌کنند و با بهبود ویژگی‌های خاک ریزوسفر سبب افزایش زیست‌فراهمی عنصرهای غذایی مانند فسفر و کاهش مصرف کودهای شیمیایی می‌شوند که در راستای کشاورزی پایدار و حفظ محیط‌زیست است. به‌طور کلی، در هر دو شرایط شور و غیرشور، کشت مخلوط گندم - خلر و گندم - ماشک و مصرف کود فسفر به‌میزان ۸۰ mg P/kg در شرایط مشابه این پژوهش برای بهبود زیست‌فراهمی فسفر و تولید محصول مطلوب توصیه می‌شود.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Akhtar, M., & Alam, S.M. (2001). Effect of incubation period on phosphate sorption from two P sources. *Journal of Biological Sciences*, 1(3), 124–125.
- Allison, L.E., & Moodie, C.D. (1965). Carbonates. Pp. 1379-1398. In: Black C.A. (Ed.). *Methods of Soil Analysis*. Part 2. *Chemical and Microbiological Properties*. Monograph No. 9, ASA, SSSA, Madison, WI, USA.
- Amrani, M., Westfall, D.G., & Moughli, L. (1999). Evaluation of residual and cumulative phosphorus effects in contrasted Moroccan calcareous soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 55, 231–238.
- Appelhans, S.C., Novelli, L.E., Melchiori, R.J.M., Gutiérrez Boem, F.H., & Caviglia, O.P. (2021). Crop sequence and P fertilization effects on soil P fractions under no-tillage. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 120(3), 275–288.
- Azadi, A., Baghernejad, M., Karimian, N.A., & Abtahi, S.A. (2015). Inorganic phosphorus fractions and their relationships with soil characteristics of selected Calcareous soils of Fars province. *Water and Soil*, 29(5), 1288–1296. In Persian with English abstract.
- Azimzadeh, Y., Najafi, N., Reyhanitabar, A., Oustan, S., & Khataee, A. (2020). Effects of phosphate loaded LDH-biochar/hydrochar on maize dry matter and P uptake in a calcareous soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 67(12), 1649–1664.
- Bagayoko, M., Alvey, S., Neumann, G., & Bürkert, A. (2000). Root-induced increases in soil pH and nutrient availability to field-grown cereals and legumes on acid sandy soils of Sudano-Sahelian West Africa. *Plant and Soil*, 225, 117–127.
- Barrow, N.J., & Ellis, A.S. (1986). Testing a mechanistic model. V. The points of zero salt effect for phosphate retention, for zinc retention and for acid/alkali titration of a soil. *Journal of Soil Science*, 37(2), 303–310.
- Betencourt, E., Duputel, M., Colomb, B., Desclaux, D., & Hinsinger, P. (2012). Intercropping promotes the ability of durum wheat and chickpea to increase rhizosphere phosphorus availability in a low P soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 46, 181–190.
- Boschetti, N.G., Quintero, C.E., & Giuffrè, L. (2009). Phosphorus fractions of soils under *Lotus corniculatus* as affected by different phosphorus fertilizers. *Biology and Fertility of Soils*, 45, 379–384.
- Bouray, M., Moir, J.L., Lehto, N.J., Condon, L.M., Touhami, D., & Hummel, C. (2021). Soil pH effects on phosphorus mobilization in the rhizosphere of *Lupinus angustifolius*. *Plant and Soil*, 469, 387–407.
- Chang, S.C., & Juo, S.R. (1963). Available phosphorus in relation to forms of phosphates in soils. *Soil Science*, 95(2), 91–96.
- Chen, C.R., Condon, L.M., Davis, M.R., & Sherlock, R.R. (2002). Phosphorus dynamics in the rhizosphere of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) and radiata pine (*Pinus radiata* D. Don.). *Soil Biology and Biochemistry*, 34(4), 487–499.
- Chorom, M., & Rengasamy, P. (1997). Carbonate chemistry, pH, and physical properties of an alkaline sodic soil as affected by various amendments. *Soil Research*, 35(1), 149–162.
- Cordell, D., Drangert, J.O., & White, S. (2009). The story of phosphorus: global food security and food for thought. *Global Environmental Change*, 19(2), 292–305.
- Dey, G., Banerjee, P., Sharma, R.K., Maity, J.P., Etesami, H., Shaw, A.K., & Chen, C.Y. (2021). Management of phosphorus in salinity-stressed agriculture for sustainable crop production by salt-tolerant phosphate-solubilizing bacteria—A review. *Agronomy*, 11(8), 1552.
- Eichler-Löbermann, B., Bachmann, S., Busch, S., Schiemenz, K., Krey, T., Pfahler, V., & Uptmoor, R. (2016). Management options for an efficient utilization of phosphorus in agroecosystems. *Phosphorus in Agriculture: 100% zero*, 179–193.
- Gee, G.W., & Or, D. (2002). Particle size analysis. Pp. 201–214. In: Dane J.H. and Topp G.C. (Eds), *Methods of Soil Analysis*. Part 4. *Physical Methods*. SSSA Book Series No. 5, Madison, WI, USA.
- Ghosh, P.K., Tripathi, A.K., Bandyopadhyay, K.K., & Manna, M.C. (2009). Assessment of nutrient competition and nutrient requirement in soybean/sorghum intercropping system. *European Journal of Agronomy*, 31(1), 43–50.
- Grattan, S.R., & Grieve, C.M. (1998). Salinity–mineral nutrient relations in horticultural crops. *Scientia Horticulturae*, 78(1-4), 127–157.
- Hatami, H., Parvizi, H., Parnian, A., & Ranjbar, G. (2024). Changes in soil-phosphorus fractions as affected by municipal sewage sludge and triple super phosphate under saline and non-saline conditions. *Water and Soil*, 37(6), 957–969. In Persian with English abstract.
- Hazelton, P. and Murphy, B. (2016). *Interpreting Soil Test Results: What Do All the Numbers Mean?* CSIRO Publishing, Australia.



- Hinsinger, P. (2001). Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. *Plant and Soil*, 237(2), 173–195.
- Hinsinger, P., Betencourt, E., Bernard, L., Brauman, A., Plassard, C., Shen, J., & Zhang, F. (2011). P for two, sharing a scarce resource: soil phosphorus acquisition in the rhizosphere of intercropped species. *Plant Physiology*, 156(3), 1078–1086.
- Hinsinger, P., Plassard, C., Tang, C., & Jaillard, B. (2003). Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and their responses to environmental constraints: a review. *Plant and Soil*, 248, 43–59.
- Holford, I.C.R. (1997). Soil phosphorus: its measurement, and its uptake by plants. *Soil Research*, 35(2), 227–240.
- IFA. (2021). International Fertilizer Association Statistics (IFASTAT). *International Fertilizer Association (IFS)*, Paris, France. <https://www.ifastat.org>
- Jia-En, Z., Ai-Xia, G., Hua-Qin, X., & Ming-Zhu, L. (2009). Effects of maize/peanut intercropping on rhizosphere soil microbes and nutrient contents. *Yingyong Shengtai Xuebao*, 20(7), 1597–602.
- Jones, J.B. (2001). *Laboratory Guide for Conducting Soil Tests and Plant Analysis*. CRC Press LLC, Boca Raton, Florida, USA. 363 Pages.
- Khoshgoftarmansh, A.H., & Nourbakhsh, F. (2009). Salinity and plant residue effects on soil available phosphorus *Journal of Plant Nutrition*, 32(6), 954–966.
- Kuczak, C.N., Fernandes, E.C., Lehmann, J., Rondon, M.A., & Luizao, F.J. (2006). Inorganic and organic phosphorus pools in earthworm casts (*Glossoscolecidae*) and a Brazilian rainforest Oxisol. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(3), 553–560.
- Kulhánek, M., Balík, J., Černý, J., Nedvěd, V., & Kotková, B. (2018). The influence of different intensities of phosphorus fertilizing on available phosphorus contents in soils and uptake by plants. *Plant, Soil and Environment*, 53, 382–387.
- Kuo, S. (1996). Phosphorus. Pp. 869–918. In: Sparks, D.L. (Ed.) *Methods of Soil Analysis. Part 3-Chemical Methods*. Book Series No. 5, SSSA and ASA, Madison, WI, USA.
- Li, H., Shen, J., Zhang, F., Clairotte, M., Drevon, J.J., Le Cadre, E., & Hinsinger, P. (2008). Dynamics of phosphorus fractions in the rhizosphere of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and durum wheat (*Triticum turgidum durum* L.) grown in monocropping and intercropping systems. *Plant and Soil*, 312, 139–150.
- Li, H., Shen, J., Zhang, F., Marschner, P., Cawthray, G., & Rengel, Z. (2010). Phosphorus uptake and rhizosphere properties of intercropped and monocropped maize, faba bean, and white lupin in acidic soil. *Biology and Fertility of Soils*, 46, 79–91.
- Li, L., Sun, J., Zhang, F., Li, X., Rengel, Z., & Yang, S. (2001). Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping: II. Recovery or compensation of maize and soybean after wheat harvesting. *Field Crops Research*, 71(3), 173–181.
- Liao, D., Zhang, C., Lambers, H., & Zhang, F. (2022). Adding intercropped maize and faba bean root residues increases phosphorus bioavailability in a calcareous soil due to organic phosphorus mineralization. *Plant and Soil*, 476(1), 201–218.
- Liao, D., Zhang, C., Li, H., Lambers, H., & Zhang, F. (2020). Changes in soil phosphorus fractions following sole cropped and intercropped maize and faba bean grown on calcareous soil. *Plant and Soil*, 448, 587–601.
- Lindsay, W.L., & Norvell, W. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42(3), 421–428.
- Lindsay, W.L. (1979). *Chemical Equilibria in Soils*. John Wiley and Sons, USA.
- Lyu, Y., Tang, H., Li, H., Zhang, F., Rengel, Z., Whalley, W. R., & Shen, J. (2016). Major crop species show differential balance between root morphological and physiological responses to variable phosphorus supply. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1939.
- Ma, B., Zhou, Z.Y., Zhang, C.P., Zhang, G., & Hu, Y.J. (2009). Inorganic phosphorus fractions in the rhizosphere of xerophytic shrubs in the Alxa Desert. *Journal of Arid Environments*, 73(1), 55–61.
- Ma, X., Yang, J., Zhou, X.J., Wu, H.T., Xiong, Q., & Li, Y. (2022). Transport of phosphorus in runoff and sediment with surface runoff from bare purple soil during indoor simulated rainfall. *Journal of Mountain Science*, 19(8), 2333–2345.
- Makoi, J.H., Chimphango, S.B., & Dakora, F.D. (2010). Elevated levels of acid and alkaline phosphatase activity in roots and rhizosphere of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.) genotypes grown in mixed culture and at different densities with sorghum (*Sorghum bicolor* L.). *Crop and Pasture Science*, 61(4), 279–286.

- Mardomi, S., Najafi, N., Reyhanitabar, A., & Dehghan, G. (2019). Effects of phosphorous and contamination of lead and zinc on extraction kinetics of the available P, Pb, and Zn in a calcareous soil under waterlogged conditions. *Journal of Water and Soil Science*, 29(2), 29–42. In Persian with English abstract.
- Marschner, P. (2012). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. Third Edition, Academic Press, London, UK.
- Martinez, V., & Läuchli, A. (1994). Salt-induced inhibition of phosphate uptake in plants of cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *New Phytologist*, 126(4), 609–614.
- McClure, S., and Roth, S. (1994). *Companion Planting*. Rodale Press, 160 pages.
- Messaoudi, H., Gérard, F., Dokukin, P., Djamai, H., Rebouh, N.Y., & Latati, M. (2020). Effects of intercropping on field-scale phosphorus acquisition processes in a calcareous soil. *Plant and Soil*, 449, 331–341.
- Motalebifard, R., Najafi, N., & Oustan, S. (2014). Effects of different soil moisture conditions and zinc sulfate and monocalcium phosphate fertilizers on the extractable-P in a calcareous soil. *Water and Soil Science*, 24(2), 227–241. In Persian with English abstract.
- Najafi, N., & Mostafae, M. (2015). Improvement of corn plant nutrition by farmyard manure application and intercropping with bean and bitter vetch in a calcareous soil. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 5(1), 1–22. In Persian with English abstract.
- Najafi, N., & Towfighi, H. (2006). Effects of rhizosphere of rice on the inorganic phosphorus fractions in paddy soils of north of Iran: 1- Native phosphorus fractions. *Iranian Journal of Agricultural Science*, 37(5), 919–933. In Persian with English abstract.
- Najafi, N., & Towfighi, H. (2012). Effects of rhizosphere of rice plant on the inorganic phosphorus fractions in the paddy soils (in North Iran) following P fertilizer application. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 43(3), 231–242. In Persian with English abstract.
- Najafi, N., & Towfighi, H. (2013). Effects of soil moisture regimes and phosphorus fertilizer on available and inorganic P fractions in some paddy soils, north of Iran. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 42(2), 257–269. In Persian with English abstract.
- Nasrin, S., Biswas, T.K., Amin, M.S., & Khatun, M. (2016). Study of salinity effects on the inorganic phosphorus transformation in three different soil series of Ganges River Floodplain. *Jahangirnagar University Journal of Biological Sciences*, 5(1), 71–79.
- Nelson, D.W., & Sommers, L.E. (1996). Total carbon, organic carbon and organic matter. Pp. 961–1010. In: Sparks D.L., Page A.L., Helmke P.A., Loeppert R.H., Soltanpour P.N., Tabatabai M.A., Johnston C.T. and Sumner M.E. (Eds). *Methods of Soil Analysis*. Part 3. *Chemical Methods*. Soil Science Society of America Book Series 5, Madison, USA.
- Ouma, G., & Jeruto, P. (2010). Sustainable horticultural crop production through intercropping: The case of fruits and vegetable crops: A review. *Agriculture and Biology Journal of North America*, 1(5), 1098–1105.
- Pearse, S.J., Veneklaas, E.J., Cawthray, G.R., Bolland, M.D., & Lambers, H. (2006). Carboxylate release of wheat, canola and 11 grain legume species as affected by phosphorus status. *Plant and Soil*, 288, 127–139.
- Penn, C.J., & Camberato, J.J. (2019). A critical review on soil chemical processes that control how soil pH affects phosphorus availability to plants. *Agriculture*, 9(6), 120.
- Piegholdt, C., Geisseler, D., Koch, H.J., & Ludwig, B. (2013). Long-term tillage effects on the distribution of phosphorus fractions of loess soils in Germany. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 176(2), 217–226.
- Reichard, P.U., Kretzschmar, R., & Kraemer, S.M. (2007). Dissolution mechanisms of goethite in the presence of siderophores and organic acids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(23), 5635–5650.
- Rhoades, J.D. (1996). Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. Pp. 417–434. In: Sparks D.L. (Ed.) *Methods of Soil Analysis*. Part 3-*Chemical Methods*. Book Series No. 5, SSSA and ASA, Madison, WI, USA.
- Safari Sinigani, A.A., & Rashidi, T. (2011). Changes in phosphorus fractions in the rhizosphere of some crop species under glasshouse conditions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 174(6), 899–907.
- Saleh, J., Najafi, N., Oustan, S., Aliasgharzad, N., & Ghassemi-Golezani, K. (2013). Changes in extractable Si, Fe, and Mn as affected by silicon, salinity, and waterlogging in a sandy loam soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 44(10), 1588–1598.
- Schaap, K.J., Fuchslueger, L., Hoosbeek, M.R., Hofhansl, F., Martins, N.P., Valverde-Barrantes, O.J., & Quesada, C.A. (2021). Litter inputs and phosphatase activity affect the temporal variability of organic



- phosphorus in a tropical forest soil in the Central Amazon. *Plant and Soil*, 469, 423–441.
- Singh, Y., Dobermann, A., Singh, B., Bronson, K.F., Bronson, C.S., & Khind C.S. (2000). Optimal phosphorus management strategies for wheat-rice cropping on loamy sand. *Soil Science Society of America Journal*, 64, 1413–1420.
- Souid, A., Hamdi, W., L'taief, B., Attallah, A., Hamdi, N., Alshaharni, M.O., & Zagrarni, M.F. (2024). The potential of durum wheat-chickpea intercropping to improve the soil available phosphorus status and biomass production in a subtropical climate. *Plos one*, 19(5), e0300573.
- Sun, B., Gao, Y., Wu, X., Ma, H., Zheng, C., Wang, X., & Yang, H. (2020). The relative contributions of pH, organic anions, and phosphatase to rhizosphere soil phosphorus mobilization and crop phosphorus uptake in maize/alfalfa polyculture. *Plant and Soil*, 447, 117–133.
- Tandon, H. (1987). Phosphorus research and Agricultural Production in India. *Fertilizer Development and Consultation Organization*, New Delhi, India.
- Thomas, G.W. (1996). Soil pH and soil acidity. Pp. 475–489. In: Sparks D.L. (Ed.) *Methods of Soil Analysis. Part 3-Chemical Methods*. Book Series No. 5, SSSA and ASA, Madison, WI, USA.
- Tian, X., Engel, B.A., Qian, H., Hua, E., Sun, S., & Wang, Y. (2021). Will reaching the maximum achievable yield potential meet future global food demand? *Journal of Cleaner Production*, 294, 126285.
- Van Dijk, G., Lamers, L.P., Loeb, R., Westendorp, P.J., Kuiperij, R., van Kleef, H. H., & Smolders, A.J. (2019). Salinization lowers nutrient availability in formerly brackish freshwater wetlands; unexpected results from a long-term field experiment. *Biogeochemistry*, 143, 67–83.
- Van Tan, L., & Thanh, T. (2021). The effects of salinity on changes in characteristics of soils collected in a saline region of the Mekong Delta, Vietnam. *Open Chemistry*, 19(1), 471–480.
- Wang, X., Deng, X., Pu, T., Song, C., Yong, T., Yang, F., & Yang, W. (2017). Contribution of interspecific interactions and phosphorus application to increasing soil phosphorus availability in relay intercropping systems. *Field Crops Research*, 204, 12–22.
- Wang, Z., Straub, D., Yang, H., Kania, A., Shen, J., Ludewig, U., & Neumann, G. (2014). The regulatory network of cluster-root function and development in phosphate-deficient white lupin (*Lupinus albus* L.) identified by transcriptome sequencing. *Physiologia Plantarum*, 151(3), 323–338.
- Wright, A.L. (2009). Phosphorus sequestration in soil aggregates after long-term tillage and cropping. *Soil and Tillage Research*, 103(2), 406–411.
- Xie, W., Yang, J., Gao, S., Yao, R., & Wang, X. (2022). The effect and influence mechanism of soil salinity on phosphorus availability in coastal salt-affected soils. *Water*, 14(18), 2804.
- Yan, X., Yang, W., Chen, X., Wang, M., Wang, W., Ye, D., & Wu, L. (2020). Soil phosphorus pools, bioavailability and environmental risk in response to the phosphorus supply in the red soil of southern China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(20), 7384.
- Yan, X., Yang, W., Chen, X., Wang, M., Wang, W., Ye, D., & Wu, L. (2020). Soil phosphorus pools, bioavailability and environmental risk in response to the phosphorus supply in the red soil of Southern China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17, 7384.
- Yang, Z., Zhang, Y., Wang, Y., Zhang, H., Zhu, Q., Yan, B., & Luo, G. (2022). Intercropping regulation of soil phosphorus composition and microbially-driven dynamics facilitates maize phosphorus uptake and productivity improvement. *Field Crops Research*, 287, 108666.
- Ye, X.F., Bai, J.H., Lu, Q.Q., Zhao, Q.Q., & Wang, J.J. (2013). Soil phosphorus pools, bioavailability and environmental risk in response to the phosphorus supply in the red soil of Southern China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17, 7384.
- Yu, X., Keitel, C., & Dijkstra, F.A. (2021). Global analysis of phosphorus fertilizer use efficiency in cereal crops. *Global Food Security*, 29, 100545.
- Zheli, D., Kheir, A.M., Mohamed, M.G., Ali, O.A.M., Abdelaal, A.I.N., Lin, X.E., Zhou, Z., Wang, B., Liu, B., & He, Z. (2020). The integrated effect of salinity, organic amendments, phosphorus fertilizers, and deficit irrigation on soil properties, phosphorus fractionation and wheat productivity. *Scientific Reports*, 10(1), 2736.