

## Original article

**Optimum amount of quinoa leaf phosphorus under the inoculation of *Trichoderma harzianum* and *Pseudomonas fluorescens* in saline condition****Amir Parnian<sup>1\*</sup>**, **Hossein Parvizi<sup>1</sup>**, **Hadis Hatami<sup>1</sup>**, **Hossein Kari Dolatabad<sup>2</sup>**, **Amir Hassanzadeh<sup>3</sup>**

1. Assistant Professor, National Salinity Research Center (NSRC), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Yazd, Iran

2. Assistant Professor, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

3. National Salinity Research Center (NSRC), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Yazd, Iran

Received 12 February 2024; Revised 10 December 2024; Accepted 19 December 2024

**Extended abstract****Introduction**

Phosphorus is a vital element for plant growth and development, as it participates in various metabolic processes, such as photosynthesis, respiration, energy transfer, and nucleic acid synthesis. Terrestrial plants mainly absorb phosphorus from the soil solution through their roots, mostly in the form of  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  and  $\text{HPO}_4^{2-}$ . However, environmental factors, such as salinity, pH, temperature, and other soil properties, influence the availability and uptake of phosphorus. Salinity is a significant abiotic stress that decreases phosphorus availability and uptake. Plants have varying abilities to uptake phosphorus under saline conditions, and this can be improved by the collaboration and sometimes coexistence of microorganisms, such as fungi and bacteria. Quinoa is a halophyte, a salt-tolerant plant, which has been suggested as a potential crop for salt-affected lands, which are increasing due to climate change and human activities. Quinoa has high nutritional and economic value, as well as a broad adaptability to different environmental conditions. However, the information on the management of phosphorus fertilizer requirement for quinoa cultivation, especially in the Iran's soil conditions, is inadequate and it is necessary to determine leaf optimal phosphorus concentration under saline conditions and the effects of *Trichoderma harzianum* and *Pseudomonas fluorescens* inoculation.

**Materials and methods**

The experiment was conducted in a greenhouse environment. Soil with low phosphorus concentration was collected and sieved. Then the soil was sprayed twice with phosphorus fertilizer solution (triple superphosphate) and incubated for four weeks at room condition to obtain nine different phosphorus concentrations. Plastic pots were filled with the soil and leached with saline water ( $\text{EC} = 12 \text{ dS.m}^{-1}$ ) until the soil salinity reached  $\text{EC} = 12 \text{ dS m}^{-1}$ . Six pots were assigned for each phosphorus concentration. Each pot contained about 10 kg of soil and 25 quinoa (cultivar TTKK) seeds that were sown in it. After two weeks of growth, the weak seedlings were thinned to four per pot. Then the microorganisms, which were selected and prepared by the Soil Biology Research Department, Soil and Water Institute (*T. harzianum* and *P. fluorescens*), were inoculated to the pots. Irrigation was done with saline water ( $12 \text{ dS.m}^{-1}$ ); also, the pots were fertigated with potassium sulfate ( $0.2 \text{ g.pot}^{-1}$ ) and potassium nitrate ( $0.3 \text{ g.pot}^{-1}$ ) three times. The soil was analyzed for  $\text{ECe}$  and pH. The phosphorus content of mature leaves was examined

\* Corresponding author: Amir Parnian; E-Mail: [amir.parnian86@gmail.com](mailto:amir.parnian86@gmail.com)

six weeks before harvesting. The plant yield was also measured after harvesting. Mathematical-statistical model used to compute leaf optimal phosphorus concentration for quinoa plant under *T. harzianum* and *P. fluorescens* inoculation treatment in saline conditions. Identification of significant differences was performed using one-way ANOVA, which  $p < 0.05$  is considered significant in differences. Microsoft Excel 2010 and SPSS Version 16 used to perform statistical analyses.

### Results and discussion

In this experiment, the total mean relative yield of quinoa treated with *T. harzianum* was not significantly different from that of pots treated with *P. fluorescens*. This implies that microbial treatments had little effect on the final ecological function of the soil and there was still a need for fertilizers to restock the phosphorus, which lost with uptake from the soil. *T. harzianum* treatment had a greater effect on the relative yield of plants in soils with lower available phosphorus concentrations. However, *P. fluorescens* treatment achieved the maximum production potential at lower available phosphorus concentrations, but the potential production of quinoa treated with *T. harzianum* was higher than that of *P. fluorescens*. The optimal phosphorus concentration of leaves for quinoa in this study was  $0.09 \text{ mg.kg}^{-1}$  for *T. harzianum* treatment and  $0.08 \text{ mg.kg}^{-1}$  for *P. fluorescens* treatment, respectively. However, the model-predicted growth potential of quinoa treated with *T. harzianum* (93%) was higher than that of soils treated with *P. fluorescens* (81%).

### Conclusion

This research demonstrated that *T. harzianum* treatment was more effective than *P. fluorescens* treatment in saline conditions. Moreover, the quinoa (TTKK cultivar) absorbed a minimal amount of phosphorus in near-optimal conditions, might indicating that this plant required less phosphorus fertilizers in saline soils. Nevertheless, the results of this research needed to be verified and validated in full-scale/field conditions before utilizing them in decision-making and plant policy planning.

### Acknowledgments

We hereby express our thanks and appreciation to the management, faculty members and staff of the National Salinity Research Center and the Soil and Water Institute of Iran that have helped in the implementation and improvement of this research.

**Keywords:** Inoculation, Fertilizer Management, Phosphorus, Quinoa, Salinity

## مقدار بهینه فسفر در برگ کینوا در شرایط تلقیح *Trichoderma harzianum* و *Pseudomonas fluorescens* در شرایط شور

امیر پرنیان<sup>۱\*</sup>، حسین پرویزی<sup>۱</sup>، حدیث حاتمی<sup>۱</sup>، حسین کاری دولت آباد<sup>۲</sup>، امیر حسن زاده<sup>۳</sup>

۱. استادیار، مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد
۲. استادیار، موسسه خاک و آب کل کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج
۳. مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد

| مشخصات مقاله             | چکیده                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| واژه‌های کلیدی:          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| تلقیح                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| مدیریت کود               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| کینوا                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| فسفر                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| شوری                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۳ | فسفر از عناصر ضروری برای گیاهان است و جذب آن از خاک با همیاری و گاهی همزیستی ریزجانداران افزایش می‌یابد. کینوا که گیاهی شورزیست اختیاری است که برای کشت در مناطق شور مورد توجه قرار دارد. اطلاعات موجود در خصوص مدیریت کودهای فسفر در محصول کینوا خصوصاً در شرایط خاک‌های کشور ناکافی بوده و ضروری است تا حد بهینه فسفر در شرایط شور پس از تلقیح <i>Trichoderma harzianum</i> و <i>Pseudomonas fluorescens</i> بررسی گردد. بدین منظور آزمایش کشت گلدانی کینوا در محیط گلخانه در شرایط شور با ۹ مقدار اولیه فسفر و ۲ نوع تلقیح میکروبی به اجرا درآمد. در حین آزمایش از هر گلدان حدود ۵ برگ بالغ برداشت و میزان فسفر کل برگ سنجش شد. نتایج نشان داد مقدار بهینه فسفر در برگ بالغ گیاه کینوا رقم تی‌تی‌کاکا در شرایط این آزمایش به ترتیب با تیمارهای قارچ تریکودرما ۰/۰۹٪ و باکتری سودوموناس ۰/۰۸٪ برگ بالغ خشک است؛ بنابراین توصیه می‌گردد که با توجه به این نتایج و اندازه‌گیری میزان فسفر برگ در مزارع کینوا نسبت به مدیریت صحیح مصرف کودهای فسفردار اقدام گردد. |

### مقدمه

(واکنش) محلول خاک است. بالاترین حلالیت و جذب فسفر توسط گیاه در واکنش خاک ۶/۵ تا ۷ رخ می‌دهد. کمبود فسفر در گیاه سبب عدم تولید میوه و دانه شده و رنگ دگرگون می‌شود (Raghothama, 2005; White and Brown, 2010). کودهای رایج فسفردار به دلیل توانایی حرکت بسیار کم در خاک، کارایی مصرف پائینی دارند. همچنین به میزان زیادی تثبیت کودهای فسفردار در خاک-های آهکی وجود دارد که سبب شده تا مقدار مصرف واقعی کودهای فسفردار بالاتر از نیاز خالص آن در نظر گرفته شود. این امر در بسیاری از خاک‌های کشاورزی سبب فزونی شدید

فسفر که با نماد علمی P شناخته می‌شود یکی از عناصر ۱۸ گانه ضروری برای نمو گیاه است و از عناصر مغذی و پرمصرف گیاهان به شمار می‌رود. فسفر به شکل‌های شیمیایی اسید فسفریک، دی هیدروژن فسفات و هیدروژن فسفات قابل جذب است. فسفر مؤثر در ایجاد بافت‌های گیاهی و در خاک به دو شکل فرم آلی و فرم معدنی یافت می‌شود. گیاه معمولاً نیاز خود را از ترکیبات معدنی فسفر تأمین می‌کند و در مواردی اشکال بسیار ریز آلی فسفر دار نیز جذب می‌شوند. فسفر معدنی بیشتر همراه عناصر Al، Fe و Ca است و حلالیت کانی‌های فسفردار خاک به شدت تحت تأثیر pH

یکی از مهم‌ترین موارد مدیریت مزرعه هر گیاه، تعیین حد بهینه عناصر در برگ گیاه و پاسخ گیاه به تغذیه و کوددهی است. حد بهینه برگ، حداقل غلظت عنصر فسفر در برگ گیاه به نحوی که گیاه کاهشی در رشد یا محصول نشان ندهد است. روش‌های متعددی برای تعیین سطح فسفر بهینه در برگ گیاهان در دسترس است که اصلی‌ترین آن استفاده از ارتباط بین میزان تولید گیاه و میزان فسفر برگ شاخص گیاه است. بدین صورت که حد بهینه فسفر برگ برابر با مقدار حداکثر تولید گیاه حاصل از حداقل غلظت فسفر برگ بالغ کینوا در نظر گرفته می‌شود (Johnston et al., 2014). سپس برای سنجش ارتباط بین میزان تولید و غلظت فسفر در برگ و تعیین حدود بهینه عناصر مدل آماری ساده (Cate and Nelson, 1971) بر پایه معادله میچرلیخ، مدل‌های ریاضی دیگر (Poulton et al., 2013) و یا مدل‌سازی با توابع ریاضی آماری (Sahrawat 2006; Sahrawat et al., 2016) استفاده می‌شود.

قارچ‌های تریکودرما (Bononi et al., 2020) از طریق افزایش انحلال فسفر و بهبود جذب آب در ریشه گیاه و باکتری‌های سودوموناس (Ning et al., 2019) با افزایش انحلال فسفر و نشر اسیدهای آلی به محیط ریشه از جمله ریزجاندارانی هستند که می‌توانند جذب فسفر گیاهان را در شرایط شور بهبود بخشند. باین حال، پژوهش‌های کافی در این زمینه برای گیاه کینوا انجام نشده است و دلیل آن را می‌توان در عدم استفاده از کودهای شیمیایی و سنتزی در کشت گسترده کینوا در کشورهای عمده تولیدکننده دانست. استفاده از میکروارگانیسم‌های می‌تواند بر حد بحرانی

عناصر در خاک و یا حد بهینه برگ گیاهان مؤثر باشد. با توجه به کمبود اطلاعات در خصوص تعیین حد بهینه فسفر برگ گیاه کینوا پس از تیمارهای میکروبی و اهمیت توسعه کشت کینوا در راضی تحت اثر شوری (خاک و آب شور)، این پژوهش باهدف تعیین حد بهینه فسفر برگ گیاه کینوا پس از تیمار تریکودرما (*Trichoderma harzianum*) و سودوموناس (*Pseudomonas fluorescens*) در شرایط شور انجام شد.

مقادیر فسفر نسبت به خاک‌های مرتعی و بکر محلی شده است (Raghothama, 2005).

با افزایش شوری خاک و آب، توانایی گیاه در تشکیل ریشه‌ها کاهش می‌یابد و پتانسیل آب خاک کاهش می‌یابد. همچنین، حضور یون سدیم در خاک و آب، باعث می‌شود که کودهای فسفردار کمتر به گیاه منتقل شوند و اثرگذاری آن‌ها کم شود. شوری خاک و آب نه تنها مانع جذب عناصر غذایی توسط گیاه می‌شود، بلکه رشد گیاه را نیز محدود می‌کند و میزان ترشحات ریشه‌ای که برای تغذیه ریزجانداران مفید خاک مهم است را کاهش می‌دهد. این عوامل باعث می‌شوند که فعالیت ریزوسفر که نقش مهمی در تبادل مواد و انرژی بین گیاه و خاک دارد، کاهش یابد (Belouchrani et al., 2019; Papan et al., 2021).

ریزجانداران با افزایش قابلیت حل شدن ترکیبات فسفات در خاک، جذب آن‌ها توسط گیاهان را بهبود می‌بخشند. همچنین نقش مؤثری در پویایی فسفر خاک و در دسترس بودن آن برای گیاهان ایفا می‌کنند و معمولاً به عنوان ریزجانداران حل‌کننده فسفات شناخته می‌شوند. این ریزجانداران با روش‌های مختلفی مانند کلات سازی، اسیدی سازی خاک، ترشح اسیدهای آلی، ترشح هورمون‌های رشدی و تحریک رشد ریشه، در جذب و زیست جذبی فسفر و در نتیجه افزایش کارایی جذب کودهای فسفردار کمک می‌کنند (Frew, 2019; Ning et al., 2019). مهم‌ترین این ریزجانداران عبارت‌اند از باکتری‌های سودوموناس (Bononi et al., 2020)، قارچ تریکودرما (Adhikari et al., 2020) و قارچ‌های میکوریز آربوسکولار (Smith et al., 2011).

با توجه به تغییر اقلیم و مصرف بیش‌ازحد، منابع آبی سنتی کاهش یافته و شوری خاک و آب افزایش یافته است. گیاه کینوا یکی از گیاهان شورزیست اختیاری است و تحمل خوبی نسبت به شوری دارد (Zurita-Silva et al., 2014). این گیاه در مناطق شور ایران در حال گسترش است و برای بهبود مدیریت مزرعه آن، نیاز به شناسایی بیشتر ویژگی‌های آن وجود دارد (Papan et al., 2022). حد بهینه فسفر در برگ شاخص گیاه از عوامل تعیین‌کننده میزان تولید است. همچنین حد فسفر بهینه گیاه تحت اثر جذب از خاک و عوامل مؤثر بر جذب آن عنصر از خاک است. حد بهینه فسفر برای محصولات مرسوم بین ۰/۲ تا ۱/۱٪ برآورد شده است (Khoshgoftarmanesh, 2007).

## مواد و روش‌ها

### محل انجام آزمایش

این پژوهش در طی یک فصل رشد در مرکز ملی تحقیقات شوری یزد و با همکاری مشترک موسسه خاک و آب کشور در کرج انجام شده است. بخش میکروبی و کشت ریزجانداران در آزمایشگاه بیولوژی موسسه خاک و آب کشور و بخش گلخانه‌ای و کشت گیاه کینوا در یزد صورت گرفته است. محل انجام پژوهش دارای مختصات جغرافیایی ۳۱،۹۱۸۱۹۷ درجه عرض شمالی و ۵۴،۲۸۲۷۳۲ درجه طول شرقی بود. در طول دوره رشد دمای گلخانه بین ۲۵-۲۷ درجه و رطوبت بین ۴۵-۵۵ درصد کنترل شد.

این پژوهش به منظور رسیدن به هدف اصلی به شکل گلدانی طراحی و برای این منظور، خاکی با مقدار کمترین فسفر قابل جذب، ماده آلی و کلسیم فعال انتخاب شد. انتخاب خاک بر اساس اطلاعات میدانی افراد باتجربه و نمونه برداری انجام شد. با فرض اینکه غلظت فسفر قابل جذب پس از کوددهی با گذر زمان در خاک کاهش می‌یابد (Billah et al., 2019) و همچنین مقدار مورد نیاز برای ارزیابی کیفیت حاصلخیزی خاک در رابطه با عنصر فسفر مقدار غلظت فسفر قابل جذب است (Khan et al., 2018)، خاک‌ها با محلول کود فسفر (سوپر فسفات تریپل خریداری شده از بازار محلی) دو بار محلول پاشی شده و به مدت ۴ هفته انکوبه گذاری شدند تا مقادیری نسبتاً مشابه ۲/۸، ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ میلی گرم بر کیلوگرم غلظت فسفر را ایجاد کنند. خصوصیات فیزیکی-شیمیایی خاک مورد استفاده در این پژوهش در جدول (۱) ارائه شده است.

### آماده سازی گلدان‌ها و تنظیم شوری خاک

برای ایجاد شرایط شور در خاک، گلدان‌ها با آبی که قابلیت هدایت الکتریکی آن ۱۲ دسی زیمنس بر متر بوده است آبیاری شدند تا شوری خاک به همان سطح یعنی قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع ۱۲ دسی زیمنس بر متر برسد. خصوصیات فیزیکی-شیمیایی آب مورد استفاده در جدول (۲) ذکر شده است. این آب از ترکیب آب بسیار شور ( $TDS = 320 \text{ g.l}^{-1}$ ) و آب شهری ( $TDS = 320 \text{ mg.l}^{-1}$ ) و پس از تنظیم نسبت کلسیم به منیزیم با استفاده از کلرید کلسیم (درجه آزمایشگاهی، تهیه شده از مجتمع صنایع شیمیایی دکتر مجللی،  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  شماره CAS 10035.01.8) تهیه شد.

جدول ۱. خصوصیات خاک مورد استفاده در آزمایش

Table 1. some characteristics of the examined soil

| Feature                       | ویژگی                          | Unit<br>واحد           | Value<br>مقدار |
|-------------------------------|--------------------------------|------------------------|----------------|
| Sand                          | شن                             | (%)                    | 68.6           |
| Silt                          | سیلت                           | (%)                    | 15.4           |
| Clay                          | رس                             | (%)                    | 16.0           |
| Soil Textural class           | کلاس بافت خاک                  |                        | Sandy loam     |
| ECe                           | هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک | (dS m <sup>-1</sup> )  | 5.0            |
| pH                            | واکنش خاک                      |                        | 7.42           |
| Organic Carbon                | کربن آلی                       | (%)                    | 0.21           |
| Total nitrogen                | نیتروژن کل                     | (%)                    | 0.026          |
| Available potassium           | پتاسیم قابل جذب                | (mg.kg <sup>-1</sup> ) | 151            |
| Available phosphorus          | فسفر قابل جذب                  | mg.kg <sup>-1</sup>    | 1.9            |
| Field capacity (FC)           | رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای (FC)      | (%)                    | 20.5           |
| Permanent wilting point (PWP) | رطوبت نقطه پژمردگی دائم        | (%)                    | 11.5           |

### کشت گیاهان

پس از گلدان گیری خاک، کشت گیاه کینوا (*Chenopodium quinoa cultivars TTKK*) در شرایط گلخانه‌ای آغاز شد. شش گلدان برای هر غلظت فسفر در نظر گرفته شد (سه گلدان برای هر تیمار میکروبی) و آزمایش در محیط کنترل شده گلخانه انجام شد. در هر گلدان که حاوی حدود ۱۰ کیلوگرم خاک، ۲۵ بذر کینوا کاشته شد. پس از سبز شدن اولیه و تا مرحله استقرار، گیاهچه‌های ضعیف به تدریج حذف شده تا ۴ گیاهچه باقی ماند. سپس گیاهان مراقبت شدند و برای تیمار زیستی آماده شدند.

### آبیاری

دو هفته از ابتدای کاشت از اختلاط آب با شوری ۲ و ۱۲ (جدول ۲) آب با شوری ۶ دسی زیمنس بر متر تهیه و تا استقرار گیاه با همین آب آبیاری شد. سپس آبیاری گلدان‌ها با آب با شوری ۱۲ دسی زیمنس بر متر (جدول ۲) ادامه یافت و از گیاهان مراقبت لازم انجام شد. پس حدود سه ماه و رسیدگی کامل، گیاهان برداشت شد.

## تیمار زیستی و کوددهی

ریزجانداران مقاوم به شوری *Pseudomonas fluorescens* و *Trichoderma harzianum* (Kumawat et al., 2024) که افزایش‌دهنده جذب فسفر (Bononi et al., 2020; Ning et al., 2019) نیز هستند، با همکاری بخش تحقیقات بیولوژی خاک موسسه تحقیقات خاک و آب تکثیر و همراه سازی شده و به‌عنوان دو تیمار به گلدان‌ها اضافه شدند. مایه تلقیح چارچ تریکودرما (حدود ۱۰ گرم) و باکتری سودوموناس (۲۵ میلی‌لیتر) پس از استقرار ۴ گیاهچه به گلدان‌ها افزوده شدند. گیاهان با آب شور (جدول ۲) آبیاری شدند و کوددهی با سولفات پتاسیم (۰/۲ گرم بر گلدان) و نیتрат پتاسیم (۰/۳ گرم بر گلدان) در سه مرحله (الف: گیاهان چهار تا شش برگی؛

ب: از ظهور غنچه تا گلدهی؛ ج: ابتدای پر شدن دانه) انجام شد. پیش از رسیدگی گیاهان خاک همه گلدان‌ها برای تأیید وجود میکروارگانیسم فعال به بخش بیولوژی موسسه خاک کشور ارسال و این امر تأیید شد.

## آزمایش‌های خاک و برگ

خاک‌ها قبل از کاشت مورد آزمایش شوری (ECe)، پی‌اچ و فسفر قابل جذب (استخراج با بیکربنات سدیم؛ اندازه‌گیری با روش رنگ‌سنجی با معرف مولیبدات آمونیوم و آسکوربیک اسید در طول موج ۸۸۰ نانومتر و دستگاه Genesys 6 Spectrophotometer) قرار گرفتند (جدول ۳).

Table 2. Some characteristics of the irrigation water

| SAR            | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | Cl <sup>-</sup> | K <sup>+</sup> | Na <sup>+</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> | Mg <sup>2+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | pH  | EC                 |
|----------------|-------------------------------|-----------------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------|------------------|-----|--------------------|
| نسبت جذب سدیمی | سولفات                        | کلر             | پتاسیم         | سدیم            | بی‌کربنات                     | کربنات                        | منیزیم           | کلسیم            |     | هدایت الکتریکی     |
|                |                               |                 |                |                 |                               |                               |                  |                  |     | dS.m <sup>-1</sup> |
| 6.5            | 1.2                           | 27.9            | 0.06           | 16.8            | 1.1                           | 0.0                           | 4.3              | 9.1              | 8   | 2                  |
| 13.7           | 4.1                           | 111.0           | 0.17           | 70.0            | 2.9                           | 0.0                           | 17               | 35               | 7.9 | 12.0               |

جدول ۳. غلظت فسفر (mg.kg<sup>-1</sup>) قابل جذب پیش از کاشتTable 3. Available phosphorus concentration (mg kg<sup>-1</sup>) before cultivation

| سودوموناس                      | 2.8 | 3.6 | 5.8 | 10.3 | 10.4 | 13.7 | 18.1 | 18.7 | 19.7 |
|--------------------------------|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|
| <i>Pseudomonas fluorescens</i> |     |     |     |      |      |      |      |      |      |
| تریکودرما                      | 2.8 | 3.6 | 8   | 15.6 | 17.4 | 23.3 | 23.8 | 24.2 | 28.1 |
| <i>Trichoderma harzianum</i>   |     |     |     |      |      |      |      |      |      |

Corporation Equipment-Salinity Bridge شماره کاتالوگ (۵۵۰۰) در عمق‌های تقریبی ۷ و ۱۵ سانتی‌متر قرار داده شده است. این حسگرها که پیش از آن کالیبره شده بودند، برای کنترل و تنظیم شوری خاک محیط رشد گیاه کینوا به کار گرفته شدن و با هر حسگر هشت قرائت در طول دوره رشد گیاهان انجام شد. گیاهان پس از ریشه‌دار شدن با آب شور (EC=12 dS.m<sup>-1</sup>) آبیاری شدند. برای هر سطح فسفر، دو حسگر در گلدان‌ها قرار داده شد و میانگین داده‌های حاصل از قرائت این حسگرها در جدول (۴) آمده است. نتایج جدول (۴) نشان‌دهنده کنترل نسبتاً مناسب شوری در گلدان‌ها است. میانگین شوری نسبتاً یکسان خاک گلدان‌ها نیز تأییدی بر این است که شرایط گلدان‌ها مشابه بوده است.

برای محاسبه و تخمین حد بهینه فسفر در برگ گیاه کینوا در شرایط این آزمایش، از مرحله غنچه‌دهی تا پیش از مرحله رسیدگی، زمانی که همه برگ‌ها سبز هستند، پس از ظهور برگ‌های بالغ، از هر گلدان حدود ۵ برگ بالغ برداشت و میزان فسفر کل برگ سنجش شد. برای اندازه‌گیری فسفر برگ، عصاره با روش سوزاندن خشک تهیه‌شده و اندازه‌گیری فسفر با روش رنگ‌سنجی با معرف مولیبدات آمونیوم و آسکوربیک اسید در طول موج ۸۸۰ نانومتر و دستگاه Genesys 6 Spectrophotometer انجام شد (Olsen et al., 1954). عملکرد گیاهان پس از برداشت اندازه‌گیری شد. برای نظارت بر شوری بستر رشد گیاهان، برای هر شش گلدان دو حسگر از دستگاه شوری‌سنج (Soil moisture



جدول ۴. شوری تخمینی خاک با استفاده از دستگاه پل شوری

Table 3. Estimated soil salinity using Salinity Bridge Cat. No. 5500

|                                                                              |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| غلظت فسفر (mg.kg <sup>-1</sup> ) قابل جذب پیش از کاشت                        | 8    | 10.3 | 17.4 | 18.1 | 18.7 | 23.3 | 28.1 |
| Available phosphorus concentration (mg kg <sup>-1</sup> ) before cultivation |      |      |      |      |      |      |      |
| عمق کار گذاشتن حسگر در خاک (cm)                                              | 7    |      |      |      |      |      |      |
| The depth of placing the sensor in the soil (cm)                             |      |      |      |      |      |      |      |
| میانگین شوری خاک (dS m <sup>-1</sup> )                                       | 15.3 | 15.9 | 15.5 | 15.4 | 14.5 | 15   | 15.3 |
| Average soil salinity (dS m <sup>-1</sup> )                                  |      |      |      |      |      |      |      |
| عمق کار گذاشتن حسگر در خاک (cm)                                              | 15   |      |      |      |      |      |      |
| The depth of placing the sensor in the soil (cm)                             |      |      |      |      |      |      |      |
| میانگین شوری خاک (dS.m <sup>-1</sup> )                                       | 19.1 | 19.3 | 19.1 | 20.6 | 18.8 | 19.5 | 18.9 |
| Average soil salinity (dS.m <sup>-1</sup> )                                  |      |      |      |      |      |      |      |

### تعیین غلظت بهینه فسفر در برگ

به کمک توابع ریاضی و آماری مناسب میزان حد بهینه فسفر در برگ گیاه کینوا برای رشد در شرایط شور تحت تیمار ریزجانداران تریکودرما و سودوموناس تعیین شد. بدین صورت که توابع نمایی (توان دوم) برای داده‌های نمودار غلظت فسفر برگ-عملکرد نسبی گیاه برازش داده شد. سپس با انتگرال‌گیری و حل معادله حاصله نقطه بحرانی نمودار محاسبه شد. نقطه بحرانی در تابع غلظت فسفر برگ بالغ عملکرد نسبی گیاه برابر با حد بهینه برگ در نظر گرفته شد (Sahrawat 2008; Sahrawat et al., 2016).

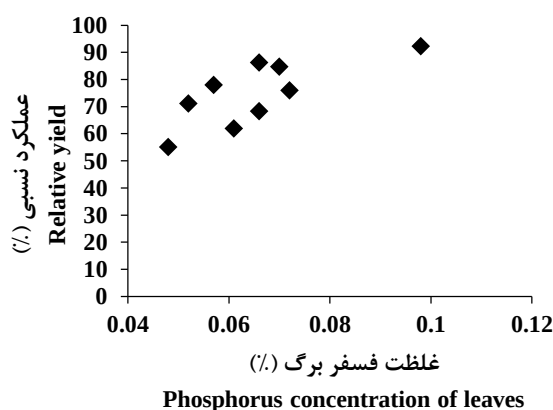
### آنالیز آماری

برای نشان دادن تغییرات عملکرد گیاهان و فسفر برگ بالغ و همچنین بررسی اختلاف معنی‌دار آماری عملکرد ناشی از سطوح مختلف فسفر قابل جذب خاک، از آمار توصیفی برای تهیه نمودار و آمار تحلیلی برای مقایسه آماری نتایج استفاده شده است. برای این منظور، از آزمون تی-استیودنت (Student's two-sample t-tests) در سطح معناداری ۵٪ درصد برای مقایسه میانگین‌ها استفاده شده است. نرم‌افزارهای آماری MS-Excel 2010 و IBM SPSS 16.0 برای انجام محاسبات آماری به کاررفته‌اند.

### نتایج و بحث

گیاهان در شرایط گلدانی با مقادیر اولیه متفاوت فسفر کشت شد. در جدول (۳) مقادیر غلظت فسفر قابل جذب پیش از آزمایش پس از آبخویی (تنظیم شوری اولیه) ارائه شده است.

دو تیمار قارچ تریکودرما و باکتری سودوموناس برای بهبود شرایط جذب گیاه استفاده شد. مقایسه میانگین عملکرد نسبی کینوا در تیمارهای میکروبی مختلف نشان داد که بین عملکرد نسبی میانگین هر یک از تیمارهای میکروبی اختلاف معنی‌دار (در سطح ۵ درصد) مشاهده نمی‌شود. مقدار غلظت فسفر برگ بالغ گیاهان اندازه گرفته شد و نتایج عملکرد نسبی در قیاس با غلظت برگ گیاه، حاصل از تیمار قارچ تریکودرما در شکل (۱) و حاصل از باکتری سودوموناس در شکل (۲) نشان داده شده است. این اشکال نمایشگر روند کلی افزایش مثبت عملکرد نسبی ازای افزایش غلظت فسفر برگ می‌باشند.

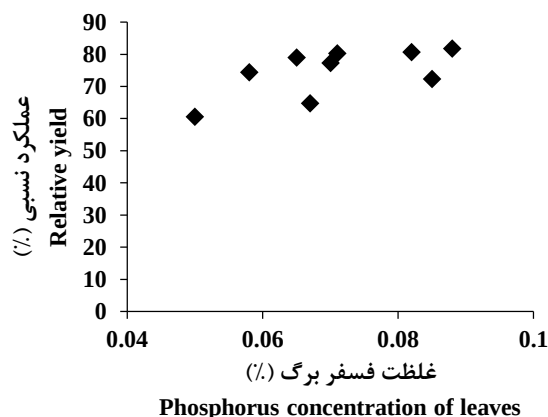


شکل ۱. نمودار عملکرد نسبی کینوا در مقدار غلظت فسفر برگ بالغ گیاهان تحت تیمار قارچ تریکودرما

Fig. 2. Relative yield of quinoa in different phosphorus concentration of leaves *Trichoderma harzianum* treatments

مقدار غلظت فسفر برگ بالغ (C) گیاهان اندازه گرفته شد و نتایج عملکرد نسبی (RY) در قیاس با غلظت برگ گیاه، حاصل از تیمار قارچ تریکودرما در شکل (۱) و حاصل از

است. همان طور که در شکل های (۳) تا (۶) قابل مشاهده است، هر دو مدل به خوبی توانایی پیش بینی عملکرد گیاه بر اساس غلظت فسفر گیاه را دارند.



شکل ۳. نمودار عملکرد نسبی کینوا در مقدار غلظت فسفر برگ بالغ گیاهان تحت تیمار باکتری سودوموناس

Fig. 3. Relative yield of quinoa in different phosphorus concentration of leaves *Pseudomonas fluorescens* treatments

باکتری سودوموناس در شکل (۲) نشان داده شده است. داده های مربوطه با تابع دوم برازش داده شد. با توجه به اینکه حداقل غلظت فسفر برگ که بیشترین مقدار عملکرد نسبی را ایجاد کند حد بهینه غلظت در برگ گیاه کینوا است، لذا کم ترین مقدار نقطه بحرانی تابع یادشده برابر با حد بهینه غلظت فسفر در برگ گیاه خواهد بود (جدول ۵).

همان طور که در جدول (۵) قابل مشاهده است، هنگامی که مقدار حد بحرانی ابتدا با همه ۹ داده (حاصل از هر ۹ تیمار) محاسبه شد. نتایج حاصل از برازش داده ها ضریب تبیین مناسبی نشان نداد، لذا بار دیگر از شش داده با غلظت اولیه فسفر خاک کمتر همان عملیات تکرار شد و نتایج مطلوب تری به دست آمد. با توجه به منطقی تر بودن محاسبه دوم، حد بهینه فسفر برگ در حضور قارچ تریکودرما ۰/۰۹ درصد و در حضور باکتری سودوموناس ۰/۰۸ درصد محاسبه شد این مقادیر در قیاس با فسفر برگ بالغ دیگر گیاهان مرسوم بسیار ناچیز بوده و تفاوت اندکی با هم دارند (جدول ۶).

نمودارهای صحت سنجی و واسنجی دو مدل برتر قیدشده در جدول (۵) (ردیف های سوم و چهارم) در ادامه آورده شده

جدول ۵. حد بهینه فسفر در برگ گیاه کینوا رقم تی تی کاکا

Table 5. the optimum level of phosphorus in the leaves of quinoa -TTKK

| تیمار<br>Treatment                 | تابع غلظت - عملکرد نسبی<br>Relative yield- available concentration<br>function | ضریب<br>تبیین<br>R <sup>2</sup> | نقطه بحرانی<br>Critical point<br>(Critical<br>concentration<br>level)<br>mg.kg <sup>-1</sup> | عملکرد نسبی مدل در<br>نقطه بحرانی<br>Predicted relative yield<br>in critical<br>concentration level<br>% |
|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Trichoderma harzianum</i>       | $RY = (-7884.8 \times C^2) + (1769.8 \times C) - 5.7688$                       | 0.59 <sup>ns</sup>              | 0.11                                                                                         | 93.5                                                                                                     |
| <i>Pseudomonas fluorescens</i>     | $RY = (-16781 \times C^2) + (2718.5 \times C) - 31.398$                        | 0.49 <sup>ns</sup>              | 0.08                                                                                         | 78.7                                                                                                     |
| <i>Trichoderma harzianum</i> ***   | $RY = (-14214 \times C^2) + (2729.3 \times C) - 38.775$                        | 0.75*                           | 0.09                                                                                         | 93.2                                                                                                     |
| <i>Pseudomonas fluorescens</i> *** | $RY = (-20882 \times C^2) + (3368.3 \times C) - 54.046$                        | 0.93**                          | 0.08                                                                                         | 81.8                                                                                                     |

ns, \* and \*\* به ترتیب معنی دار و غیر معنی دار در سطح احتمال یک و پنج درصد

\*\*\* از شش داده با غلظت اولیه کوچک تر استفاده شده است.

ns, \* and \*\*: Not-significant and significant at 5% and 1% probability levels, respectively.

\*\*\* Six data with lower initial P concentrations were used

## بحث

تریکودرما و عملکرد نسبی گیاهان تحت تیمار باکتری سودوموناس وجود ندارد. این یعنی تیمارهای میکروبی تأثیر قابل توجهی بر بهبود عملکرد اکولوژیک خاک نداشته اند و برای تأمین مواد مغذی مورد نیاز گیاهان که از خاک برداشت شده اند، هنوز نیاز به استفاده از کودهای شیمیایی

در این پژوهش، اثر تیمارهای میکروبی قارچ تریکودرما و باکتری سودوموناس بر عملکرد نسبی گیاه کینوا در شرایط شور مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تفاوت معنی داری بین عملکرد نسبی گیاهان تحت تیمار قارچ



وجود دارد. به عبارت دیگر، کودهای زیستی نمی‌توانند جایگزین کودهای شیمیایی شوند، بلکه فقط می‌توانند مصرف آن‌ها را بهینه کنند (Yadav and Sarkar, 2019).

جدول ۶. مقدار فسفر بهینه در برگ چند گیاه (Khoshgoftarmansh, 2007)

Table 6. The optimal amount of phosphorus in the mature leaves of some plants

| نام گیاه     | دامنه کفایت فسفر برگ بالغ (%)                     |
|--------------|---------------------------------------------------|
| Plant name   | Phosphorus sufficiency range of mature leaves (%) |
| Sugar beet   | 1.10-0.45                                         |
| چغندر قند    |                                                   |
| Winter wheat | 0.50-0.21                                         |
| گندم زمستانه |                                                   |
| Soybean      | 0.50-0.26                                         |
| سویا         |                                                   |
| Alfalfa      | 0.70-0.26                                         |
| یونجه        |                                                   |
| Cabbage      | 0.75-0.35                                         |
| کلم          |                                                   |
| Lettuce      | 0.60-0.40                                         |
| کاهو         |                                                   |

در سطوح پایین غلظت فسفر قابل جذب خاک، تیمار قارچ تریکودرما باعث افزایش عملکرد نسبی گیاهان شد؛ اما در سطوح بالاتر فسفر قابل جذب خاک، تیمار باکتری سودوموناس به پتانسیل حداکثر تولید نزدیک‌تر شد، اگرچه هنوز کمتر از تیمار قارچ تریکودرما بود (شکل‌های ۱ و ۲). بر اساس پژوهش‌های پیشین، مکانیسم اثر قارچ تریکودرما برای افزایش مقاومت گیاهان به شوری، خشکی و بهبود جذب عناصر، عمدتاً از طریق توسعه ریشه انجام می‌شود (Rollano-Peñaloza et al., 2018). در حالی که مکانیسم اثر باکتری

جدول ۷. فسفر مورد نیاز برای عملکرد بهینه گیاه کینوا

Table 7. Phosphorus demand for optimal yield of quinoa

| ردیف | نوع گیاه                    | مقدار فسفر مورد نیاز                               | منبع                     |
|------|-----------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------|
| Row  | Plant type                  | Available phosphorous demand (kg P2O2 per hectare) | Reference                |
| 1    | Chenopodium quinoa-Wildd.   | 100                                                | Deng et al., 2022        |
| 2    | Chenopodium quinoa-Giza 1   | 280                                                | Jorfi et al., 2023       |
| 3    | Chenopodium quinoa-Q26      | 280                                                | Jorfi et al., 2023       |
| 4    | Chenopodium quinoa-Titicaca | 280                                                | Jorfi et al., 2023       |
| 5    | Chenopodium quinoa-Titicaca | 90                                                 | Abdolahpour et al., 2021 |
| 6    | Chenopodium quinoa-Wildd.   | 70                                                 | Bouras et al., 2022      |

سودوموناس برای افزایش تحمل شوری و جذب فسفر، متفاوت هست (Cai et al., 2021). این تفاوت در مکانیسم‌های اثر می‌تواند علت تفاوت در عملکرد نسبی گیاهان کشت‌شده تحت تیمارهای میکروبی یادشده باشد.

در پژوهش، نیاز گیاه کینوا به فسفر در شرایط شور موردسنجش قرار گرفت. نتایج سنجش شده نشان داد که این گیاه در شرایط شور می‌تواند با مقادیر کمی از فسفر رشد کند (جدول ۴) که با نتایج حاصله از برخی پژوهش‌های پیشین موافق و با برخی نیز چندان همخوان نیست (جدول ۷).

این ویژگی می‌تواند امکان کشت این گیاه را در اراضی کم بارور و ضعیف فراهم کند. با این حال، برای اطمینان از این موضوع، لازم است که روند توسعه گیاه کینوا در شرایط مختلف شوری و فسفر مجدداً موردبررسی قرار گیرد. همچنین، قبل از انتقال و تسری نتایج این پژوهش به سطوح کلان مدیریت مزارع، باید آزمایش‌ها در مقیاس مزرعه تحقیقاتی تکرار شود و در صورت تأیید نتایج، توصیه‌های لازم به مدیران مزارع تجاری ارائه شود.

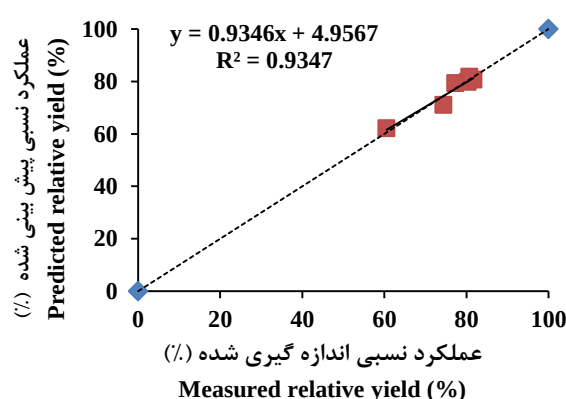
با توجه اینکه نمی‌توان مقدار مشخص و دقیقی برای حد بهینه عناصر (Nutrient Sufficiency) در برگ گیاه ارائه کرد، لذا دامنه کفایت عناصر در منابع مطرح می‌شود و بین دو مقدار غلظتی است که بازه ۱۰٪ بیشتر و کمتر عملکرد نسبی بیشینه است (Sahrawat 2006; Sahrawat 2008). حد بهینه فسفر در برگ بالغ گیاه کینوا در شرایط این آزمایش به ترتیب با تیمارهای قارچ تریکودرما ۰/۰۹ درصد برگ بالغ خشک و باکتری سودوموناس ۰/۰۸ درصد برگ بالغ خشک و عملکرد نسبی پیش‌بینی شده ۹۳ و ۸۱ درصد محاسبه شد (جدول ۴).

فسفر برای برنج آپلند را حداقل ۳۰ و حداکثر ۶۰ کیلوگرم در هکتار فسفر خالص در خاک با فسفر قابل جذب ۲/۹ میلی‌گرم

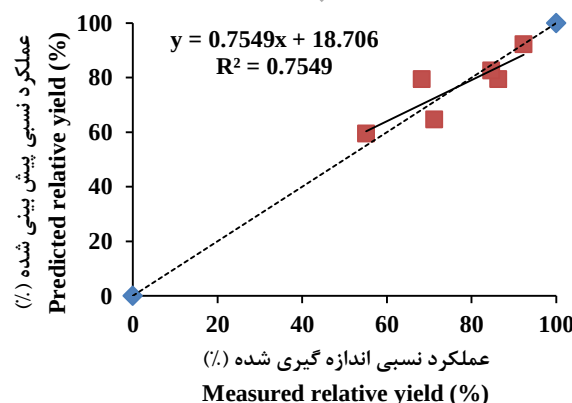
این مقادیر نسبتاً پایین فسفر نشان‌دهنده نیاز کم این گیاه به فسفر در شرایط شور می‌باشند. میزان حد اثربخشی

شاخص مناسب‌تری توصیف شده است (Sahrawat 2000; Sahrawat 2006; Sahrawat 2008; Sahrawat et al., 2016). باین‌حال، برای اعتباربخشی به این نتایج، لازم است که نمونه‌برداری از مزارع مختلفی که این گیاه را کشت می‌کنند (تجاری یا تحقیقاتی) انجام شود و در صورت تأیید نتایج، توصیه‌های مناسب برای مدیریت کودی گیاه کینوا ارائه شود.

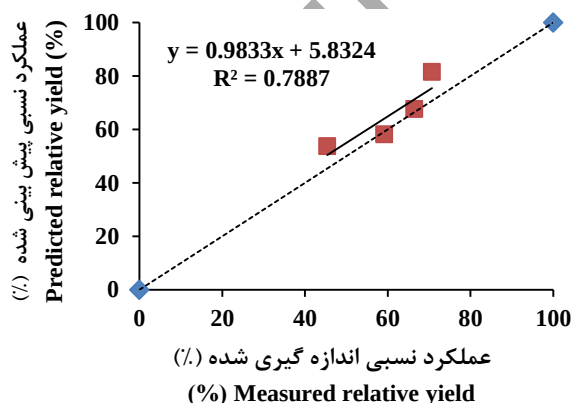
بر کیلوگرم معرفی شده است (Sahrawat et al., 1995). مدلی خطی و جعبه سیاه برای تخمین نیاز فسفر گونه‌ای از برنج معرفی شده است (Sahrawat 2008). فسفر قابل جذب شاخص مناسبی برای پیش‌بینی میزان عملکرد گیاه و تعمیم به خاک‌های مختلف نیست و لازم است تا به میزان فسفر خالص برداشت‌شده توسط توجه داشت (Sahrawat 1999). در مطالعات دیگری میزان فسفر برگ و حد بهینه برگ را



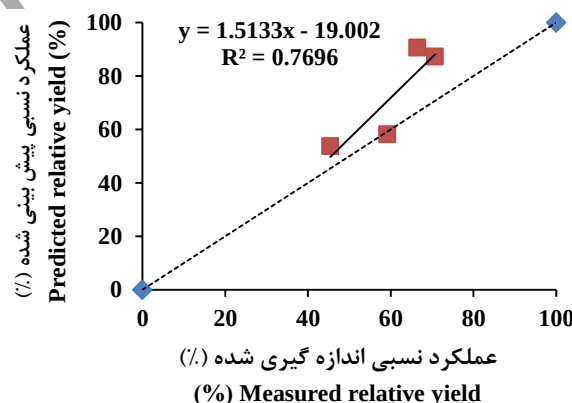
شکل ۴. نمودار صحت‌سنجی مدل - تیمار قارچ تریکودرما  
Fig. 4. Validation diagram of the model - *Trichoderma harzianum* treatment



شکل ۳. نمودار واسنجی مدل تیمار قارچ تریکودرما  
Fig. 3. Model calibration diagram - *Trichoderma harzianum* treatment



شکل ۶. نمودار صحت‌سنجی مدل باکتری سودوموناس  
Fig. 6. Validation diagram of the model *Pseudomonas fluorescens* treatment



شکل ۵. نمودار واسنجی مدل - باکتری سودوموناس  
Fig. 5. Model calibration diagram - *Pseudomonas fluorescens* treatment

۰/۰۸٪ برگ بالغ خشک است؛ اما با توجه به مدل ریاضی - آماری استفاده شده، پتانسیل شد گیاه در تیمار قارچ تریکودرما (۹۳/۸٪) بیشتر از تیمار باکتری سودوموناس (۸۴/۴٪) خواهد بود. در شرایط این آزمایش (شور و گلخانه - ای) تیمار قارچ تریکودرما مؤثر بر میزان جذب فسفر مؤثر بوده و گیاه کینوا نسبتاً گیاهی کم‌نیاز به کودهای فسفردار است؛

### نتیجه‌گیری نهایی

به‌طور کلی از این پژوهش می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که حد بهینه فسفر در برگ بالغ گیاه کینوا رقم تی‌تی‌کاکا در شرایط این آزمایش به ترتیب با تیمارهای قارچ تریکودرما (*Trichoderma harzianum*) ۰/۰۹٪ برگ بالغ خشک و باکتری سودوموناس (*Pseudomonas fluorescens*)

## سپاسگزاری

بدین وسیله از مدیریت، اعضای هیئت علمی و کارکنان مرکز ملی تحقیقات شوری و موسسه خاک و آب کشور که در اجرا و بهبود این تحقیق کمک نموده‌اند تشکر و قدردانی می‌شود.

اما لازم است قبل بسط این نتایج و استناد به آن‌ها، از مزارع متعدد نمونه‌برداری و در صورت تأیید مجدد نتایج در تصمیم‌گیری برای مدیریت کود گیاه کینوا بازنگری نمود.

## منابع

- Abdolahpour, H., Tohidi Nejad, E., Pasandi Pour, A., 2021. Effect of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on morpho-physiological characteristics and seed yield of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). Journal of Crop Ecophysiology. 15, 57-72. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.30495/jcep.2021.681006>
- Adhikari, A., Khan, M.A., Lee, K.E., Kang, S. M., Dhungana, S.K., Bhusal, N., Lee, I.J., 2020. The halotolerant rhizobacterium *Pseudomonas koreensis* MU2 enhances inorganic silicon and phosphorus use efficiency and augments salt stress tolerance in soybean (*Glycine max* L.). Microorganisms. 8, 1256. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8091256>
- Alandia, G., Odone, A., Rodriguez, J.P., Bazile, D., Condori, B., 2021. Quinoa—Evolution and future perspectives. The Quinoa genome, 179-195. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-65237-1\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-65237-1_11)
- Belouchrani, A.S., Latati, M., Ounane, S.M., Drouiche, N., Lounici, H., 2019. Study of the interaction salinity: phosphorus fertilization on sorghum. Plant Growth Regulation. 1-6. <https://doi.org/10.1007/s00344-019-10057-4>
- Billah, M., Khan, M., Bano, A., Hassan, T. U., Munir, A., Gurmani, A. R., 2019. Phosphorus and phosphate solubilizing bacteria: Keys for sustainable agriculture. Geomicrobiology Journal, 36, 904-916. <https://doi.org/10.1080/01490451.2019.1654043>
- Bononi, L., Chiamonte, J. B., Pansa, C. C., Moitinho, M. A., Melo, I. S., 2020. Phosphorus-solubilizing *Trichoderma* spp. from Amazon soils improve soybean plant growth. Scientific Reports, 10, 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59793-8>
- Bouras, H., Choukr-Allah, R., Amouaouch, Y., Bouaziz, A., Devkota, K.P., El Mouttaqi, A., Bouazzama, B., Hirich, A., 2022 How does quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) respond to phosphorus fertilization and irrigation water salinity? Plants. 11, 216. <https://doi.org/10.3390/plants11020216>
- Cai, D., Xu, Y., Zhao, F., Zhang, Y., Duan, H., Guo, X., 2021. Improved salt tolerance of *Chenopodium quinoa* Willd. contributed by *Pseudomonas* sp. strain M30-35. PeerJ. 9, e10702. <https://doi.org/10.7717/peerj.10702>
- Cate Jr, R.B., Nelson, L.A., 1971. A simple statistical procedure for partitioning soil test correlation data into two classes. Soil Science Society of America Journal. 35, 658-660. <https://doi.org/10.2136/SSSAJ1971.03615995003500040048X>
- Deng, Y., Zhao, L., Anwar, S. et al., 2002. Phosphorus fertigation conferred lodging tolerance and improved grain quality in *Chenopodium quinoa* via enhanced root proliferation and stalk strength. Soil Science and Plant Nutrition. 22, 5099-5110. <https://doi.org/10.1007/s42729-022-00986-7>
- Frew, A., 2019. Arbuscular mycorrhizal fungal diversity increases growth and phosphorus uptake in C3 and C4 crop plants. Soil Biology and Biochemistry, 135, 248-250. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.05.015>
- Johnston, A.E., Poulton, P.R., Fixen, P.E., Curtin, D., 2014. Phosphorus: its efficient use in agriculture. Advances in agronomy. 123, 177-228. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-420225-2.00005-4>
- Jorfi, A., Alavifazel, M., Gilani, A., Ardakani, M. R., Lak, S., 2023. Quinoa (*Chenopodium quinoa*) root system development as affected by phosphorus and zinc sulfate application in an alkaline soil. Gesunde Pflanzen, 75, 885-897. <https://doi.org/10.1007/s10343-022-00740-0>
- Khan, A., Lu, G., Ayaz, M., Zhang, H., Wang, R., Lv, F., Yang, X., Sun, B. Zhang, S., 2018. Phosphorus efficiency, soil phosphorus dynamics and critical phosphorus level under long-term fertilization for single and double cropping systems. Agriculture, Ecosystems &

- Environment. 256, 1-11.  
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.01.006>
- Khoshgoftarmanesh, A. H., 2007. Evaluation of Plant Nutrition Status and Optimum Fertilizer Management, First ed. Isfahan University of Technology. Isfahan, Iran. [In Persian]
- Kumawat, K. C., Sharma, P., Sirari, A., Sharma, B., Kumawat, G., Nair, R. M., Bindumadhava, H., 2024. Co-existence of halo-tolerant *Pseudomonas fluorescens* and *Enterococcus hirae* with multifunctional growth promoting traits to ameliorate salinity stress in *Vigna radiata*. Chemosphere, 349, 140953.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140953>
- Ning, Y., Xiao, Z., Weinmann, M., Li, Z., 2019. Phosphate uptake is correlated with the root length of celery plants following the association between arbuscular mycorrhizal fungi, *Pseudomonas* sp. and biochar with different phosphate fertilization levels. Agronomy, 9, 824.  
<https://doi.org/10.3390/agronomy9120824>
- Olsen, S.R., Cole, C.V., Watanabe, F.S. Dean, L.A., 1954. In: Klute, A. (Ed), Methods of Soil Analysis: Physical Properties, Part 1, second ed. Agron Monogr, No 9. Madison WI: ASA and SSSA. pp. 403–430.
- Papan, P., Moezzi, A., Chorom, M., Rahnama, A., 2021. The effect of urea fertilizer application and sugarcane field drainage on some soil properties, grain yield and nutrient concentrations in quinoa seeds. Journal of Soil Management and Sustainable Production. 11, 71-90. [In Persian with English abstract].  
<https://doi.org/10.22069/ejsms.2021.18528.1988>
- Papan, P., Moezzi, A., Chorom, M., Rahnama, A., 2022. Biochemical and physiological response of quinoa to application of different levels of nitrogen and salinity irrigation water. Environmental Stresses in Crop Sciences, 15, 501-515. [In Persian with English Summary].  
<https://doi.org/10.22077/escs.2021.3846.1923>
- Poulton, P. R., Johnston, A. E., White, R. P., 2013. Plant- available soil phosphorus. Part I: the response of winter wheat and spring barley to Olsen P on a silty clay loam. Soil Use and Management, 29, 4-11.  
<https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2012.00450.x>
- Raghothama, K. G., 2005. Phosphorus and plant nutrition: an overview. Phosphorus: Agriculture and the Environment. 46, 353-378.  
<https://doi.org/10.2134/agronmonogr46.c11>
- Rathore, S., Kumar, R., 2021. Vermicompost fertilization and pinching improves the growth, yield, and quality of super food (*Chenopodium quinoa* Willd.) in the western Himalaya. Acta Physiologiae Plantarum. 43, 23.  
<https://doi.org/10.1007/s11738-020-03184-z>
- Rollano-Peñaloza, O. M., Widell, S., Mollinedo, P., Rasmusson, A. G., 2018. Trichoderma harzianum T-22 and BOL-12QD inhibit lateral root development of *Chenopodium quinoa* in axenic co-culture. Cogent Biology. 4, 1530493.  
<https://doi.org/10.1080/23312025.2018.1530493>
- Sahrawat, K. L., 1999. Assessing the fertilizer phosphorus requirement of grain sorghum. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 30, 1593-1601.  
<https://doi.org/10.1080/00103629909370311>
- Sahrawat, K. L., 2000. Determining fertilizer phosphorus requirement of upland rice. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 31, 1195-1208.  
<https://doi.org/10.1080/00103620009370507>
- Sahrawat, K. L., 2006. Plant nutrients: sufficiency and requirements. Encyclopedia of Soil Science. 1, 1306-1310.  
<https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/NOE0849338304-120042731/plant-nutrients-sufficiency-requirements-kanwar-sahrawat>
- Sahrawat, K. L., 2008. Direct and residual phosphorus effects on grain yield-phosphorus uptake relationships in upland rice on an ultisol in West Africa. International Journal of Plant Production. 2, 281-287.  
<https://oar.icrisat.org/id/eprint/737>
- Sahrawat, K.L., Jones, M.P., Diatta, S., 1995. Response of upland rice to phosphorus in an Ultisol in the humid forest zone of West Africa. Fertilizer Research. 41, 11-17.  
<https://doi.org/10.1007/BF00749515>
- Sahrawat, K. L., Wani, S. P., Girish Chander, G. C., Pardhasaradhi, G., Krishnappa, K., 2016. Soil nutrient mapping for on-farm fertility management. In Harnessing dividends from drylands: innovative scaling up with soil nutrients (pp. 59-77). Wallingford UK: CABI.  
<https://doi.org/10.1079/9781780648156.0059>
- Smith, S. E., Jakobsen, I., Grønlund, M., Smith, F. A., 2011. Roles of arbuscular mycorrhizas in

plant phosphorus nutrition: interactions between pathways of phosphorus uptake in arbuscular mycorrhizal roots have important implications for understanding and manipulating plant phosphorus acquisition. *Plant Physiology*. 156, 1050-1057. <https://doi.org/10.1104/pp.111.174581>

White, P. J., Brown, P. H., 2010. Plant nutrition for sustainable development and global health. *Annals of Botany*, 105, 1073-1080. <https://doi.org/10.1093/aob/mcq085>

Yadav, K. K., Sarkar, S., 2019. Biofertilizers, impact on soil fertility and crop productivity under sustainable agriculture. *Environment and Ecology*. 37, 89-93.

Zurita-Silva, A., Fuentes, F., Zamora, P., Jacobsen, S.E., Schwember, A.R., 2014. Breeding quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): potential and perspectives. *Molecular Breeding*, 34, 13-30. <https://doi.org/10.1007/s11032-014-0023-5>

نسخه پیش از انتشار