Research Article

Agricultural Engineering., 48(4) (2025) 507 - 530

DOI: 10.22055/agen.2025.50279.1785

ISSN (P): 2588-526X

ISSN (E): 2588-5944

Investigating the response of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) to different levels of phosphorus under salinity stress and determining its critical limit in soil and plant

M. Abooei [1], N. Boroomand [2], M. Salehi[3]

1. Soil Science Department, Faculty of Agriculture,, Shahid Bahonar university of Kerman
2. Associate Professor, Department of Soil Science Engineering, Shahid Bahonar University
3. National salinity research center, Agricultural research, Education and Extension Organization(AREEQ), Yazd, Iran.

Received: 29 July 2025 Accepted: 27 September 2025 *Corresponding Author: nboroomand@uk.ac.ir

Abstract

Introduction: Soil salinity is a major problem in arid and semi-arid regions, which reduces plant yield and thus threatens food security. Soil salinity limits plant growth by limiting plant access to water, creating nutritional imbalances, and causing osmotic stress in plants. In addition, phosphorus deficiency is also a common problem in these regions. Providing optimal levels of nutrients, especially phosphorus, can reduce the negative effects of salt stress and improve plant performance. The aim of this experiment is to determine the critical phosphorus level in soil and leaves and to investigate the response of yield, yield components, and phosphorus uptake of quinoa plants at two levels of salt stress.

Materials and Methods: An experiment was conducted in a completely randomized design with three factors of soil phosphorus including 10 levels (S1-S10), phosphorus application at two levels (application of 9 mg per Kg soil and non-application) and two levels of irrigation water salinity (6 and 12 6 dS m^{-1}) with three replications in pots. In this experiment, the values calculated manually using the phosphorus fertilizer equivalent formula according to the soil test, phosphorus was added from triple superphosphate at the rates of 25.25, 50.5, 67.32, 92.57, 109.46; 134.71, 151.54, 176.79 and 218.87 mg Kg of soil with 15% moisture content and was incubated for one year due to the process of phosphorus fixation by gypsum and lime in the soil. Then, to apply phosphorus levels (0 and 9 mg phosphorus Kg^{-1}) soil was added from a triple superphosphate source. To determine the critical phosphorus level in leaves at the flowering stage, samples were taken from leaves close to the panicule. Biomass, seed weight, and harvest index were measured. The phosphorus content in shoots and seeds was also measured by the dry digestion method.

© 2025 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Results and Discussion: The results showed that salinity stress of 12 dS m^{-1} reduced grain yield and biomass by 17 and 24 percent, respectively, but the harvest index increased by 4.5 percent. The application of phosphorus fertilizer increased grain yield and harvest index. Also, salinity stress of 12 dS m^{-1} reduced grain phosphorus uptake (20 %), shoot phosphorus uptake (55 %), and finally plant phosphorus uptake (29 %). The greatest positive effect of phosphorus was observed in soils with salinity of 6 dS m^{-1}. The interaction results showed that initial phosphorus levels also played an important role in determining the effect of salinity and phosphorus fertilizer. Soils with available phosphorus of 8 and 13 mg kg^{-1} showed significantly higher biomass (20 and 19.8 g pot^{-1}) under 6 dS m^{-1} salinity stress and phosphorus application, while soil with available phosphorus of 16 mg kg^{-1} had the lowest biomass (12 g pot^{-1}) under 12 dS m^{-1} conditions. The critical phosphorus limit for soils with salinity of 6 dS m^{-1} and 12 dS m^{-1} was 8.9 and 13.8 mg kg^{-1}, respectively, and based on leaf phosphorus was 1.9 and 2.25 g kg^{-1}.

Conclusion: In general, these results showed that optimal management of phosphorus fertilization and reduction of the effects of salinity stress improved growth and yield of quinoa. This is especially important in areas with moderate salinity for sustainable use of soil and water resources. Careful management of phosphorus nutrition under saline conditions is essential to improve phosphorus allocation to seeds and maintain crop yield and quality.

Keywords: Keith-Nelson, Harvest Index, Phosphorus management, Salt stress

مقاله پژوهشی

بررسی واکنش گیاه کینوا *(Chenopodium quinoa Willd)* به سطوح مختلف فسفر تحت تنش شوری و تعیین حد بحرانی آن در خاک و گیاه

منیره ابویی[۱]، ناصر برومند[۲]، معصومه صالحی[۳]

۱- گروه مهندسی علوم خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲- دانشیار گروه مهندسی علوم خاک دانشگاه شهید باهنر

۳- مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی- یزد - ایران

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۷

پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۰۷/۰۵

کلمات کلیدی:
تنش شوری،
شاخص برداشت،
کیت نلسون،
مدیریت فسفر

* عهده دار مکاتبات

Email: nboroomand@uk.ac.ir

چکیده

شوری خاک یکی از مشکلات عمده در مناطق خشک و نیمه‌خشک است که باعث کاهش عملکرد گیاهان و در نتیجه تهدید امنیت غذایی می‌شود. شوری خاک با محدود کردن دسترسی گیاه به آب، ایجاد عدم تعادل تغذیه‌ای و ایجاد تنش اسمزی در گیاهان، رشد گیاه را محدود می‌کند علاوه بر این کمبود فسفر نیز از مشکلات رایج در این مناطق است. تامین سطح بهینه عناصر غذایی به ویژه فسفر می‌تواند اثرات منفی تنش شوری را کاهش داده و عملکرد گیاه را بهبود بخشد. هدف از این آزمایش تعیین حد بحرانی فسفر در خاک و برگ و بررسی واکنش عملکرد، اجزای عملکرد و جذب فسفر گیاه کینوا در دو سطح تنش شوری است. به همین منظور آزمایشی گلدانی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه فاکتور در سه تکرار اجرا شد. فاکتورهای آزمایش شامل سطح اولیه فسفر خاک در ۱۰ سطح S_1 تا S_{10}، کاربرد فسفر (در دو سطح کاربرد (۹ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) و عدم کاربرد) و شوری آب آبیاری (در دو سطح تنش شوری ٦ و ۱۲ دسی زیمنس بر متر) در مجموع در ۱۲۰ گلدان اجرا شد. نتایج نشان داد تنش شوری ۱۲ دسی زیمنس بر متر عملکرد دانه و زیست توده را به ترتیب به میزان ۱۷ و ۲٤ درصد کاهش داد، اما شاخص برداشت ٤/٥ درصد افزایش یافت. کاربرد کود فسفر موجب افزایش عملکرد دانه و شاخص برداشت شد. همچنین تنش شوری ۱۲ دسی‌زیمنس‌برمتر سبب کاهش جذب فسفر دانه (۲۰ درصد)، اندام هوایی (٥٥ درصد) و در نهایت جذب فسفر گیاه (۲۹ درصد) شد. بیشترین تأثیر مثبت فسفر در خاک‌های با شوری ٦ dS/m مشاهده شد. نتایج اثر متقابل نشان داد که سطوح اولیه فسفر نیز نقش

مهمی در تعیین میزان تأثیر شوری و کود فسفر داشت. خاک‌های با فسفر قابل جذب ۸ و ۱۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم، بطور معنی‌داری زیست توده بالاتری (۲۰ و ۱۹/۸ گرم در گلدان) در شرایط تنش ٦ دسی زیمنس بر متر و کاربرد فسفر نشان دادند، درحالی‌که خاکی با فسفر قابل جذب ١٦ میلی‌گرم بر کیلوگرم در شرایط ۱۲ دسی زیمنس بر متر کمترین زیست توده (۱۲ گرم در گلدان) را داشت. حد بحرانی فسفر برای خاک‌های با شوری ٦ و ۱۲ دسی زیمنس بر متر به ترتیب ۸/۹ و ۱۳/۸ میلی‌گرم در کیلوگرم و براساس فسفر برگ ۱/۹ و۲/۲۵ گرم بر کیلوگرم به‌دست آمد.

مقدمه

قسمت‌های زیادی از مناطق خشک و نیمه خشک کشور بویژه در فلات مرکزی، دشت‌های ساحلی جنوب و دشت خوزستان مبتلا به سطوح مختلف شوری است (۱). با افزایش جمعیت جهان، نیاز به آب با کیفیت خوب جهت شرب، بهداشت و تولید غذا در حال افزایش است. با محدودیت منابع آب شیرین و اراضی مناسب و همچنین فشار وارده بر این منابع، انسان ناگزیر از بکارگیری آب‌های با کیفیت پایین و نامتعارف و اراضی نامرغوب، حاشیه‌ای و شور شده است. استفاده غیر اصولی از این منابع، گسترش بیش از پیش شوری را در بر خواهد داشت (۲). یکی از راه‌حل‌های جهت مقابله با این مشکل استفاده از گیاهان متحمل به شوری می‌باشد (۳). کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd)، گیاهی از خانواده تاج‌خروس (Amaranthaceae) سه‌کربنه و شورزیست اختیاری است. دانه کینوا ارزش پروتئینی بالایی داشته و نسبت به غلات متداول همچون برنج گندم و جو، پروتئین، اسیدهای آمینه، ویتامین‌های ضروری و مواد معدنی را داراست (۴). این گیاه فراسودمند، بدون گلوتن و ارزش غذایی و اقتصادی بالایی در میان محصولات داشته که می‌تواند جایگزین برنج شده و به سلامت جامعه کمک کند (۵).

با معرفی ارقام جدید کینوا و تولید بذر گواهی شده از سال ۱۴۰۰ به‌طور رسمی این گیاه وارد الگوی کشت کشور گردید. به‌منظور حداکثر بهره‌برداری اقتصادی ازسطح زیر کشت محصولات مختلف برنامه صحیح کوددهی مبتنی بر آزمون خاک بایستی استوار باشد. حد بحرانی غلظتی از عنصر در خاک است که در مقادیر کمتر از آن احتمال پاسخ گیاه به مصرف کود افزایش می‌یابد. یکی از محدودیت‌های اصلی رشد در گیاه، قابلیت کم جذب فسفر به ویژه در خاک‌های آهکی می‌باشد (۶). این عنصر، از جمله عناصر ضروری برای رشد و تکثیر، جزء ترکیبات ساختمانی سلول‌ها و بسیاری از ترکیبات شیمیایی بوده و برای ذخیره‌سازی، انتقال انرژی، حفاظت و انتقال کدهای ژنتیکی به کار می‌رود (۷). کارایی جذب و مصرف فسفر در خاک، سالی حدود ۱۰ تا ۳۰ درصد بوده و تنها جزیی از باقیمانده این عنصر در خاک ممکن است در سالیان متوالی و در نتیجه فعالیت‌های بیولوژیکی خاک آزاد شده و در دسترس گیاه قرار گیرد (۸). تخمین زده می‌شود در ۳۰-۴۰ درصد زمین‌های زراعی جهان کمبود فسفر عامل محدود کننده تولیدات کشاورزی باشد (۹). بخش عمده‌ای از خاک‌های ایران آهکی هستند و دارای ۱ تا ۵۰ درصد آهک می‌باشند بر اساس استاندارد فائو خاکی که بیش تر از ۱۵ درصد کربنات کلسیم داشته باشد آهکی محسوب می‌شود، بیشتر خاک‌های آهکی در مناطق خشک و نیمه خشک ایران قرار دارند (۱۰). در خاک‌های آهکی دسترسی فسفر کاهش می‌یابد.

حد بحرانی، عددی است که خاک را به دو گروه تقسیم می‌کند، در گروه اول، گیاه از لحاظ آماری عکس‌العمل معنی‌داری نسبت به اضافه شدن کود به خاک نشان نمی‌دهد و در گروه دوم گیاه عکس‌العمل معنی‌دار نشان می‌دهد. این عدد به عنوان میزان حداقل عنصر مورد نظر در آزمون خاک است که با حداکثر تولید محصول تعریف می‌شود (۱۱). به طور متوسط حدود بحرانی یک سری اعداد تخمینی هستند که وابسته به عواملی همچون بافت خاک، مقدار ماده آلی و میزان رس می‌باشند. برای تعیین غلظت بحرانی یک عنصر در خاک، باید خاک‌هایی با مقادیر متفاوت آن عنصر مورد مطالعه قرارگیرند و رابطه بین غلظت عنصر عصاره‌گیری شده در خاک و عملکرد نسبی به دست آید. عوامل موثر بر میزان غلظت بحرانی یک عنصر عبارتست از سن فیزیولوژیکی گیاه، نوع گیاه، ویژگی‌های خاک و مدیریت کاشت و داشت گیاه (۱۲). حد بحرانی را می‌توان با استفاده از روش‌های متفاوتی مانند روش تصویری کیت-نلسون[1] (۱۳) به‌دست آورد. با استفاده از این روش، تقسیم‌بندی خاک‌ها به دو گروه امکان‌پذیر می‌شود. گروه اول احتمال عکس‌العمل معنی‌دار نسبت به مصرف کود وجود دارد و گروه دوم احتمال عکس‌العمل آن‌ها به کود اندک است. عددی که نتایج آزمون خاک را به دو گروه تقسیم می‌کند، حد بحرانی نامیده می‌شود. هدف از این آزمایش تعیین حد بحرانی فسفر در خاک و گیاه کینوا در شوری-های مختلف و بر اساس آزمون خاک و تجزیه برگ و همچنین ارزیابی واکنش عملکرد، اجزای عملکرد و میزان جذب فسفر در سطوح مختلف فسفر و دو سطح تنش شوری است.

مواد و روش

جهت اجرای آزمایش از یک خاک با بافت متوسط و فسفر اولیه کم استفاده شد (جدول ۱). پس از هوا خشک کردن خاک و عبور از الک ۲ میلی‌متری، برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن از جمله بافت خاک به روش هیدرومتری (۱۴)، پی اچ خاک در گل اشباع به وسیله الکترود شیشه‌ای دستگاه پی اچ متر Metrohm (827) (۱۵)، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره اشباع خاک بوسیله دستگاه هدایت سنج الکتریکی Metrohm (712) (۱۶)، کربن آلی به روش والکی و بلاک (۱۷)، کربنات کلسیم معادل به روش خنثی‌سازی توسط اسید-کلریدریک (۱۳)، درصد گچ به روش رسوب با استون (۱۸) فسفر قابل استفاده با عصاره‌گیری به روش اولسن و همکاران[2] (۱۸) با دستگاه اسپکتروفتومتر Jenway (6105) UV/Vis، پتاسیم قابل جذب با استات آمونیوم با دستگاه فلیم فتومتر Sherwood (410) ، غلظت سدیم به روش فلیم فتومتر،کلسیم و منیزیم به روش تیتراسیون کمپلکسومتری، کلر محلول به روش تیتراسیون رسوب‌سنجی با نیترات‌نقره ، بی‌کربنات محلول به روش تیتراسیون و عناصر میکرو (آهن، منگنز، روی و مس) قابل جذب به روش DTPA با دستگاه جذب اتمیک پرکین المر مدل ۳۱۱۰ تعیین گردید (۱۹).

جهت تهیه خاک با مقادیر مختلف فسفر(۱۰ سطح) مورد نظر از روش پیشنهادی شهابی و ملکوتی (۲۰) استفاده شد. در این روش برای اینکه سطح فسفر خاک به سطح مورد نظر تیمارهای آزمایش برسد، مقادیر فسفر مورد نیاز محاسبه شده ، با استفاده از فرمول معادل کودی فسفر (رابطه ۱) و با توجه به نتایج اولیه آزمون خاک، از محل سوپرفسفات تریپل به خاک اضافه شد. این مقادیر در این آزمایش شامل اضافه کردن ۲۵/۲۵، ۵۰/۵، ۶۷/۳۲، ۹۲/۵۷، ۱۰۹/۴۶؛ ۱۳۴/۷۱، ۱۵۱/۵۴، ۱۷۶/۷۹ و ۲۱۸/۸۷ میلی‌گرم سوپر فسفات تریپل به ازای هر کیلوگرم خاک با رطوبت ۱۵ درصد بود. به دلیل طولانی بودن فرآیند رسیدن به سطح تعادلی فسفر اضافه شده و ثابت شدن عدد

1- Keith-Nelson

2- Olsen *et al.*

فسفر در خاک (به دلیل واکنش‌های متعدد و پیچیده فسفر در خاک مانند تثبیت فسفر توسط گچ و آهک موجود در خاک مورد آزمایش) دوره انکوباسیون به مدت یکسال در نظر گرفته شد.

رابطه ۱ $PAI = 1.25 - 0.27 \text{Clay}^{0.3}$

که PAI شاخص فسفر قابل جذب (میزان تغییر در فسفر قابل عصاره‌گیری به ازای یک میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر اضافه شده به خاک) می‌باشد.

در زمان انکوباسیون هر دوماه یکبار نمونه‌برداری از خاک انجام گرفت و میزان فسفر قابل جذب اندازه‌گیری شد که در صورت کاهش میزان فسفر از مقادیر پیش بینی شده، با اضافه کردن کود سوپرفسفات‌تریپل، کمبود فسفر جبران شد. پس از گذشت زمان فوق، میزان فسفر نهایی قابل جذب با روش اولسن در کلیه نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. میزان فسفر نهایی ۱۰ خاک در جدول ۲ گزارش شده است. آزمایشی گلدانی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه فاکتور در سه تکرار اجرا شد. فاکتورهای آزمایش شامل سطح اولیه فسفر خاک در ۱۰ سطح S_1 تا S_{10}، کاربرد فسفر (در دو سطح کاربرد ۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک و عدم کاربرد) و شوری آب آبیاری (در دو سطح۶ (تنش شوری متوسط) و ۱۲ (تنش شوری شدید) دسی زیمنس بر متر) در مجموع در ۱۲۰ گلدان اجرا شد. با توجه به بافت خاک و وزن مخصوص ظاهری آن گلدان‌ها از خاک‌های حاوی فسفر مشخص پر شدند (۲۱). آب آبیاری مورد استفاده با رقیق سازی یک نمونه آب بسیار شور طبیعی با استفاده از آب شهری (۱ دسی‌زیمنس بر متر) در دو سطح ۶ و ۱۲ دسی‌زیمنس برمتر ساخته شد. به منظور یکسان سازی نسبت جذب سدیمی و تعادل بین یون های کلسیم و منیزیم در دو نمونه آب از نمک کلریدکلسیم استفاده گردید. خصوصیات شیمیایی آب‌های آبیاری در جدول ۳ ارائه گردیده است (۲۲).

قبل از کاشت، گلدن‌ها چند بار با آب شور ۶ و ۱۲ دسی‌زیمنس‌برمتر با ضریب آبشویی ۳۰ درصد آبشویی شدند تا ترکیب محلول خاک با آب آبیاری به تعادل نسبی برسد و شوری خاک نیز در محدوده مورد انتظار قرار گیرد. این امر بوسیله کنترل حجم و شوری آب آبیاری و زه آب صورت پذیرفت. سپس ۱۴ عدد بذر سالم کینوا رقم رحمت در هفت قسمت گلدان در عمق ۲سانتی‌متری خاک کشت شد. پس از سبز شدن تعداد بوته‌ها از طریق تنک کردن به پنج عدد و در مرحله ۴ برگی (BBCH 12) به سه عدد کاهش پیدا کرد. عناصر غذایی مورد نیاز گیاه، شامل سولفات پتاسیم به میزان ۰/۵ گرم در گلدان، سولفات روی به میزان ۰/۱ گرم در گلدان، سولفات آهن و منگنز هر کدام ۰/۵ گرم در گلدان، سولفات پتاسیم به میزان ۲ گرم در گلدان، نیترات آمونیوم ۲ گرم در گلدان با در نظر گرفتن نتایج آنالیز خاک در ابتدا با خاک گلدان مخلوط شد و نیترات پتاسیم دو مرحله (BBCH 14 , 67) در مجموع به میزان ۴ گرم در گلدان از طریق آب آبیاری به گلدان‌ها اضافه شد. برحسب نیاز آبی و آبشویی، آبیاری هر شش روز یکبار انجام شد (۲۳). با هدف تعیین حد بحرانی فسفر در برگ، در مرحله گلدهی (BBCH 67) نمونه‌گیری از برگ‌های نزدیک به پانیکول صورت گرفت (۲۴) و میزان فسفر در برگ پس از شستن آن با آب مقطر در آون خشک و با روش هضم اکسیداسیون خشک (۲۵) اندازه‌گیری شد. برداشت در مرحله رسیدگی کامل دانه‌ها انجام شد. بوته ها پس از شسته‌شدن با آب مقطر داخل آون گذاشته شد تا کاملا خشک شده و سپس وزن زیست توده، وزن دانه و شاخص برداشت در هر گلدان اندازه‌گیری شد. میزان فسفر موجود در اندام هوایی و دانه نیز به روش هضم خشک (۲۶) اندازه‌گیری شد. تجزیه آماری با استفاده از نرم‌افزار SASv9 و مقایسه میانگین با روش LSD در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

نتایج و بحث

تاثیر تنش شوری و سطوح فسفر بر وزن دانه، زیست توده و شاخص برداشت

نتایج تجزیه و تحلیل داده‌ها نشان داد که اثر تنش شوری و کاربرد فسفر در سطح احتمال یک درصد و اثر سطح فسفر خاک در سطح احتمال پنج درصد بر وزن دانه معنی‌دار بودند ولی اثرات متقابل دوگانه و سه‌گانه این عوامل غیرمعنی‌دار بودند (جدول ۴). مقایسه میانگین‌های اثرات اصلی نشان داد که تنش شوری شدید (۱۲ دسی‌زیمنس بر متر) منجر به کاهش معنی‌دار (۱۷/۲۴ درصدی) وزن دانه در مقایسه با شرایط تنش شوری متوسط (۶ دسی‌زیمنس بر متر) شد. در بین خاک‌های مورد آزمایش، S7 کمترین وزن دانه با میانگین ۷/۳۱ گرم در گلدان را نشان داد و مابقی سطوح فسفر دارای بالاترین وزن دانه بودند و تفاوت معنی‌داری با هم نداشتند. کاربرد کود فسفر بالاترین وزن دانه (۹/۰۱ گرم در گلدان) و عدم کاربرد آن کمترین مقدار (۷/۴۲ گرم در گلدان) را نشان داد (جدول ۵).

براساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها اثر تنش شوری، سطح فسفر خاک و کاربرد کود فسفره بر وزن زیست توده کینوا معنی‌دار بودند. علاوه بر این، اثر متقابل شوری در سطوح فسفر و همچنین شوری در سطوح فسفر در کاربرد فسفر بر زیست توده کل نیز به ترتیب در سطح احتمال پنج و یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۴). مقایسات میانگین نشان داد که شوری بالاتر منجر به کاهش معنی‌دار (کاهش ۲۴/۰۳ درصدی) میانگین زیست توده در مقایسه با شوری ۶ دسی‌زیمنس بر متر شد. (جدول ۵). در مقایسه میانگین اثر متقابل سه‌گانه، بیشترین زیست توده مربوط به کاربرد کود فسفر در خاک S6 (فسفر قابل جذب ۸ میلی‌گرم بر گرم) تحت شرایط تنش شوری ۶ دسی‌زیمنس‌برمتر با میانگین وزن ۲۱/۷۱ گرم در گلدان بود. از طرف دیگر، کمترین زیست توده در کاربرد فسفر در خاک S6 (۸ میلی‌گرم بر گرم فسفر قابل جذب) تحت تنش شوری ۱۲ دسی‌زیمنس‌برمتر با میانگین ۱۱/۸ گرم در گلدان و بیشترین میزان زیست توده در سطح S2 (۵/۴ میلی‌گرم بر گرم فسفر قابل جذب) وکاربرد کود فسفر به میزان ۱۶/۲۹ گرم در گلدان مشاهده شد (جدول ۸).

محققان نشان دادند که کاربرد کود فسفر بر کینوا در شرایط مراکش نشان داد که برای افزایش زیست‌توده، مصرف تا ۷۰ کیلوگرم فسفر در هکتار با هدایت الکتریکی تا ۱۷ دسی‌زیمنس بر متر مناسب بوده، در حالی که برای افزایش عملکرد بذر، مصرف ۷۰ کیلوگرم در هکتار فسفر (P_2O_5) تا هدایت الکتریکی ۵ دسی‌زیمنس بر متر توصیه می‌شود. با این حال، اگر هدایت الکتریکی بالاتر از ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر باشد، میزان فسفر ۶۰ کیلوگرم در هکتار حداکثر عملکرد بذر کینوا را داشت (۲۷). کاربرد فسفر اثرات نامطلوب شوری بر چغندر قند (۲۸) را کاهش داد.

آنالیز داده‌ها نشان داد که اثر تنش شوری و کاربرد فسفر در سطح احتمال یک درصد بر شاخص برداشت کینوا معنی‌دار بودند. علاوه بر این، اثر متقابل شوری در سطوح فسفر، سطوح فسفر در کاربرد فسفر و همچنین اثر متقابل سه‌گانه شوری، سطح فسفر و کاربرد فسفر بر شاخص برداشت در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود (جدول ۴).

شاخص برداشت متأثر از تقسیم وزن دانه به زیست توده می‌باشد. شاخص برداشت میزان توزیع مواد فتوسنتزی به دانه را نشان می‌دهد. شوری شدید منجر به افزایش شاخص برداشت به میزان ۸/۶۵ درصد در مقایسه با شرایط شوری متوسط شد. همان‌طوریکه که کاربرد کود فسفره با افزایش وزن دانه منجر به افزایش میانگین این صفت در مقایسه با تیمار عدم کاربرد شد. بیشترین شاخص برداشت در مقایسه میانگین اثر متقابل سه‌گانه در کاربرد کود فسفر در خاک S6 تحت تنش شوری شدید با میانگین ۶۹/۶ درصد به‌دست آمد در حالی که عدم کاربرد کود فسفر در خاک S1 تحت شرایط تنش شوری متوسط، کمترین شاخص برداشت را با میانگین ۴۰/۱ درصد نشان داد (جدول ۵).

جدول (۱) خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

Table (1) Physical and chemical properties of soil

بافت خاک Soil texture	رس (درصد) Clay (%)	سیلت (درصد) Silt (%)	شن (درصد) Sand (%)	پتاسیم قابل دسترس (میلی‌گرم درکیلوگرم) Available potassium (mg kg $^{-1}$)	فسفر قابل دسترس (میلی‌گرم درکیلوگرم) Available phosphorus (mg kg $^{-1}$)	ماده آلی (درصد) Organic matter (%)	آهک (درصد) TNV (%)	اسیدیته Acidity	هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر) Electrical conductivity (dS m^{-1})
Sandy Loam لومی شنی	12	13	75	120	4.2	0.05	19	7.5	2.3
بی‌کربنات (میلی اکی والان بر لیتر) HCO_3^-	کلر (میلی اکی والان بر لیتر) Chlorine	سدیم (میلی اکی والان بر لیتر) Sodium	منیزیم (میلی اکی والان بر لیتر) Magnesium	کلسیم (میلی اکی والان بر لیتر) Calcium	گچ (درصد) Gypsum	مس (میلی‌گرم درکیلوگرم) Cuprum	منگنز (میلی‌گرم درکیلوگرم) Manganese	روی (میلی‌گرم درکیلوگرم) Zinc	آهن (میلی‌گرم درکیلوگرم) Ferrum
----------(Meq l^{-1})----------					(%)	---------- (mg Kg $^{-1}$)----------			
1.5	8.0	7.3	5.2	10.2	1.0	0.1	0.3	0.2	1.2

جدول (۲) میزان فسفر نهایی ده نمونه خاک استفاده شده در آزمایش

Table (2) Final phosphorus content of ten soil samples which are used in experiment

شماره خاک Soil Number	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10

فسفر قابل جذب Available phosphorus (mg Kg^{-1})	4.2	5.4	6.0	6.5	7.0	8.0	8.7	9.6	13.0	16.0

جدول (۳) خصوصیات آب آبیاری

Table (3) Irrigation water characteristics

منبع آب Water resources	هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر) Electrical conductivity (dS m^{-1})	اسیدیته acidity	کلسیم (میلی اکی والان بر لیتر) Calcium	منیزیم (میلی اکی والان برلیتر) Magnesiu	سدیم (میلی اکی والان بر لیتر) Sodium	کلر (میلی اکی والان بر لیتر) Chlorine	بی کربنات (میلی اکی والان بر لیتر) HCO_3^-	سولفات (میلی اکی والان بر لیتر) Sulfate	نسبت جذب سدیم Sodium Absorption Ratio
			---------- (Meq l^{-1})----------						
1	6	7.5	19.0	8.0	34.0	50.0	4.5	5.5	9.3
2	12	7.5	35.0	17.0	70.0	110.0	8.5	6.0	13.7

جدول (٤) تجزیه واریانس صفات مرتبط با عملکرد گیاه کینوا تحت تأثیر تیمارهای شوری، سطوح فسفر خاک و کاربرد فسفر

Table (4) Analysis of variance of traits related to quinoa plant yield under the influence of salinity treatments, soil P and phosphorus application

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات (Mean Square) وزن دانه Seed weight	وزن زیست توده Biomass	شاخص برداشت Harvest Index
شوری Salinity	1	72.25**	596.22**	629.7**
سطوح فسفر خاک Soil P	9	1.85*	6.1*	25.24 ns
کاربرد فسفر P application	1	75.64**	115.13**	459.3**
شوری × سطوح فسفر خاک Salinity×Soil P	9	1.32ns	6.12*	29.6*
شوری × فسفر Salinity× P application	1	1.943ns	5.53ns	4.23 ns
خاک × فسفر Soil P× P application	9	1.2ns	2.45ns	32.4*
شوری× سطوح فسفر خاک×کاربرد فسفر Salinity×Soil P× P application	9	1.15ns	7.53**	31.2*
خطا Error	80	0.89	2.43	13.9
ضریب تغییرات (٪) CV		11.49	9.54	7.39

ns، * و ** به ترتیب بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار و اختلاف معنی‌دار در سطح پنج و یک درصد می‌باشد.

ns, *, and ** indicate no significant difference and significant difference at the 5 and 1 percent levels, respectively.

اولین تأثیر تنش شوری، اختلال در جذب آب و مواد غذایی است (**۲۹, ۳۰**). شوری خاک باعث کاهش پتانسیل آب خاک شده و در نتیجه جذب آب توسط ریشه را با مشکل مواجه می‌کند. این کاهش جذب آب، انتقال مواد غذایی به اندام‌های هوایی را محدود کرده و در نتیجه رشد گیاه را کاهش می‌دهد (**۳۱**). در همین راستا، پژوهشگران بیان داشتند که جذب آب توسط ریشه تحت تأثیر تنش شوری ناشی از کلرید سدیم در گیاهان مختلف از جمله استویا (۵) و کینوا (۳۲) کاهش یافته و مختل شده است که یافته‌های پژوهش حاضر را تائید می‌نمایند. استفاده از کود فسفر در زمان کاشت در مقایسه با عدم کاربرد آن منجر به افزایش معنی‌دار میانگین وزن دانه، زیست توده و شاخص برداشت شد. این افزایش میانگین صفات تحت شرایط غیر شور و تنش شوری رخ داد. در این راستا، پژوهشگران بیان داشتند که فسفر می‌تواند به گیاه کمک کند تا تنش شوری را بهتر تحمل کند. این امر ممکن است به دلیل افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، بهبود جذب مواد مغذی و افزایش تولید مواد سازگار با شوری باشد (**۳۳, ۳۴**). کاربرد فسفر اثرات منفی شوری را در گیاهانی مانند کینوا (۲۷)، ماش (۳۵)، لوبیا سبز (۳۶)، نخود (۳۷)، گندم (۳۸) و چغندرقند (۲۸) کاهش داده است. مصرف فسفر با افزایش غلظت و جذب عناصر غذایی ضروری برای رشد گیاه، بهبود نسبت Ca/Na و K/Na و کاهش غلظت یون‌های سمی Na^+ و Cl^- موجب افزایش عملکرد در گیاه شده است (۳۹).

جدول (۵) مقایسه میانگین اثر اصلی شوری، سطوح فسفر و کاربرد فسفر بر برخی صفات مرتبط با عملکرد گیاه کینوا

Table (5) Mean comparison of the main effect of salinity, soil P and phosphorus application on some traits related to quinoa yield

شاخص برداشت (درصد)	وزن زیست توده (گرم در گلدان)	وزن دانه (گرم در گلدان)	تیمار (Treatment)
Harvest Index (%)	Biomass (g pot^{-1})	Seed weight (g pot^{-1})	تنش شوری (dS m^{-1}) Salt stress
48.33±2.21 b	18.56±0.3 a	8.99±0.19 a	6
52.91±1.89 a	14.1±0.23 b	7.44±0.14 b	12
			Soil P سطوح فسفر خاک
49.29±2.11 a	16.64±0.8 a	8.12±0.38 a	S1
49.92±2.85 a	17.1±0.59 a	8.55±.34 a	S2
51.32±2.44 a	16.85±0.86 a	8.61±0.39 a	S3
50.6±1.89 a	15.71±0.9 ab	7.92±0.46 ab	S4
51.15±3.05 a	16.87 ±0.86 a	8.61 ±0.43 a	S5
53.99±2.88 a	15.69±1.24 ab	8.25 ±0.56 a	S6
49.02±1.92 a	14.89±0.6 b	7.31 ±0.32 b	S7
49.79±2.13 a	16.49±0.97	8.19±0.47 a	S8
49.73±2.37 a	16.94±0.8 a	8.43±0.45 a	S9
51.35±3.11 a	16.11 ±1.11 ab	8.20 ±0.52 a	S10
			فسفر P application
48.66±3.01 b	15.35±0.34 b	7.42±0.15 b	without P عدم کاربرد application
52.57±2.88 a	17.31±0.41 a	9.01±0.18 a	P application کاربرد

کاربرد فسفر: ۹ میلی گرم فسفر در هر کیلوگرم خاک، عدم کاربرد: عدم مصرف فسفر

P application: 9 (mg/kg) phosphorus of soil, Without P application: No phosphorus application

تاثیر تنش شوری و سطوح فسفر بر غلظت و جذب فسفر در گیاه

آنالیز داده‌ها نشان داد که غلظت فسفر برگ تحت تأثیر تنش شوری، فسفر اولیه خاک و همچنین کاربرد فسفر در سطح احتمال یک درصد تفاوت معنی‌دار داشت. علاوه بر این، اثر متقابل سه‌گانه تنش شوری در سطح فسفر در کاربرد فسفر بر غلظت فسفر برگ در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۶). نتایج مقایسات میانگین داده‌ها نشان داد که تنش شوری شدید منجر به افزایش معنی‌دار غلظت فسفر برگ در مقایسه با شوری متوسط شد. علاوه بر این، کاربرد کود فسفر در مقایسه با عدم کاربرد آن نیز غلظت این عنصر را در برگ افزایش معنی‌داری داد (جدول ۷). در مقایسه میانگین اثر متقابل سه‌گانه، بیشترین غلظت فسفر برگ در شرایط استفاده از فسفر در خاک‌های S3 و S7 تحت تنش شوری شدید (۱۲ دسی‌زیمنس بر متر) با میانگین ۰/۲۸۶ و ۰/۲۹۱ درصد به‌دست آمد. در حالی که کمترین غلظت فسفر برگ در تیمار عدم کاربرد کود فسفر در خاک S4 و تحت شرایط تنش شوری متوسط با میانگین ۰/۱۰۴ درصد مشاهده شد (جدول ۸). غلظت فسفر در برگ در شرایط شور نشان می‌دهد که ریشه کینوا قادر هست در شوری بالا به جذب فسفر ادامه دهد ولی رشد کلی گیاه در اثر شوری کند شده و درنتیجه غلظت فسفر در برگ افزایش یافته است . در شرایط شور رشد ریشه کمتر می-

گردد و حجم خاک کمتری در اختیار ریشه برای جذب فسفر که دارای پخشیدگی کمی در خاک است قرار می‌گیرد و کاربرد فسفر در دسترس بودن عنصر را برای ریشه گیاه افزایش می‌دهد (۴۰).

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر تنش شوری، سطح فسفر و کاربرد فسفر و همچنین اثر متقابل سه‌گانه تنش شوری،سطح فسفر و کاربرد فسفر بر غلظت فسفر دانه معنی‌دار بودند (جدول ۶). برخلاف غلظت فسفر در برگ، غلظت فسفر در دانه در اثر تنش شوری شدید کاهش معنی‌داری نشان داد ولی کاربرد کود فسفر، غلظت این ترکیب را در دانه در مقایسه با عدم کاربرد آن افزایش داد (جدول ۷). در مقایسه میانگین اثر متقابل سه‌گانه، بیشترین غلظت فسفر دانه در کاربرد کود فسفر در خاک S8 تحت تنش شوری شدید با میانگین ۰/۵۳۱ درصد مشاهده شد. علاوه بر این، کاربرد کود فسفره در خاک‌های S1، S2، S4، S5، S7 و S8 تحت تنش شوری متوسط نیز دارای بالاترین میانگین این صفت بودند. کمترین فسفر دانه در عدم کاربرد کود فسفر در خاک S6 تحت تنش شوری شدید با میانگین ۰/۲۱۴ درصد به دست آمد (جدول ۸). مطالعات نشان داده بود تنش شوری موجب کاهش میزان فسفر دانه در گندم شد و کاهش میزان فسفر در برگ و دانه گندم در شرایط شور به دلیل کاهش رشد ریشه در خاک شور و رقابت برای جذب سایر عناصر ذکر شده است (۴۱). شوری همچنین ممکن است مانع انتقال مجدد فسفر از برگ‌های مسن‌تر به برگ‌های جوان‌تر و دانه‌های در حال رشد شود و بر توزیع مواد مغذی در گیاه تأثیر بگذارد. تحت تنش شوری، انتقال فسفر از برگ‌ها به دانه‌ها به دلیل اختلالات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی متعدد ناشی از تنش شوری به طور کلی کاهش می‌یابد (۴۲). مطالعات نشان می‌دهد که در شرایط شوری، فسفر به جای انتقال مؤثر به دانه‌ها، بیشتر در برگ‌ها و ساقه‌ها تجمع می‌یابد. این حبس شدن فسفر در برگ‌ها، دسترسی به فسفر را برای پر شدن و رشد دانه کاهش می‌دهد. شوری فعالیت فتوسنتزی و رشد کلی گیاه را کاهش می‌دهد که تولید آسیمیلات‌ها[1] و انرژی مورد نیاز برای انتقال فسفر به دانه‌ها را کاهش می‌دهد (۴۳). غلظت بالای سدیم و کلرید، تعادل یونی را مختل کرده و نسبت پتاسیم/سدیم را که برای فرآیندهای انتقال مواد مغذی حیاتی است، کاهش می‌دهد و حرکت فسفر به دانه‌ها را بیشتر محدود می‌کند (۴۳). تنش شوری اغلب با کاهش راندمان جذب، کمبود فسفر را تشدید می‌کند و این امر با کاهش عرضه فسفر به دانه‌ها همراه است.کوددهی مناسب فسفر می‌تواند قابلیت دسترسی فسفر را بهبود بخشد و تا حدی انتقال به دانه‌ها را بازیابی کند و تحمل به شوری و محتوای فسفر دانه را افزایش دهد. بطور کلی تنش شوری با محدود کردن انرژی متابولیکی، اختلال در تعادل یونی، ایجاد احتباس فسفر در برگ‌ها و کاهش توان فتوسنتزی گیاه، انتقال فسفر از برگ‌ها به دانه‌ها را کاهش می‌دهد (۴۴).

براساس نتایج به‌دست آمده ، اثر تنش شوری، سطوح فسفر و کاربرد فسفر و همچنین اثر متقابل تنش شوری، سطوح فسفر و کاربرد فسفر بر غلظت فسفر اندام هوایی معنی‌دار بودند (جدول ۶). شوری اثر غیر معنی‌دار بر غلظت فسفر اندام هوایی داشت ولی کاربرد کود فسفر، منجر به افزایش میانگین فسفر در اندام هوایی شد (جدول ۷). در مقایسه میانگین اثر متقابل تنش شوری، سطوح فسفر و کود فسفر، بالاترین غلظت فسفر در اندام هوایی مربوط به کاربرد فسفر در خاک S2 تحت تنش شوری متوسط (۰/۱۹۸ درصد) و همچنین کاربرد کود فسفر در خاکی‌های S3 و S5 تحت شرایط تنش شوری شدید (به‌ترتیب با میانگین ۰/۱۸۹ و ۰/۱۹۳ درصد) بود. کمترین میانگین این صفت نیز در عدم کاربرد کود فسفر در خاک‌های S8، S9 تحت شرایط تنش شوری متوسط (به‌ترتیب ۰/۰۳۲ و ۰/۰۳۳ درصد) و عدم کاربرد کود

1 -Assimilated

فسفر در خاک S1 و S10 تحت تنش شوری شدید (به‌ترتیب ۰/۰۳۲ و ۰/۰۳۴ درصد) به‌دست آمد (جدول ۸). بر اساس تجزیه واریانس داده‌ها، اثر تنش شوری، سطوح فسفر و کاربرد فسفر و همچنین اثرات متقابل دوگانه و سه‌گانه این عوامل بر میزان جذب فسفر در اندام هوایی معنی‌دار به‌دست آمد (جدول ۶). نتایج مقایسه میانگین اثر اصلی تنش شوری نشان داد که شوری شدید منجر به کاهش معنی‌دار میانگین جذب فسفر در اندام هوایی شد در حالی که کاربرد کود فسفره، میانگین این صفت را در مقایسه با عدم کاربرد کود فسفره افزایش داد (جدول ۷). در مقایسه میانگین اثر متقابل سه‌گانه، بیشترین جذب فسفر در اندام هوایی در کاربرد کود فسفره در خاک S2 تحت تنش شوری متوسط با میانگین ۱۲/۷۹ میلی‌گرم در گلدان مشاهده شد در صورتی که کمترین جذب فسفر در اندام هوایی در عدم کاربرد کود فسفره در خاک S1 تحت تنش شوری شدید (با میانگین ۱/۳۳ میلی‌گرم در گلدان) ثبت شد (جدول ۸).

میزان جذب فسفر دانه تحت تأثیر تنش شوری، سطوح فسفر و همچنین کاربرد فسفر متفاوت معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد نشان داد (جدول ۶). مقایسات میانگین نشان داد تنش شوری شدید منجر به کاهش میزان جذب این عنصر در دانه شد به طوری که در سطح ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر شوری، کاهش جذب فسفر دانه ۲۰/۷۲ درصد در مقایسه با سطح شوری ۶ دسی‌زیمنس بر متر بود (جدول ۷). در بین خاک‌های مورد آزمایش نیز، خاک S5 دارای بالاترین میزان جذب فسفر دانه (۳۵/۹۶ میلی‌گرم در گلدان) و S7 دارای کمترین میزان جذب فسفر دانه با میانگین ۲۷/۳۴ میلی‌گرم در گلدان بودند (جدول ۷). براساس نتایج مقایسات میانگین داده‌ها، استفاده از کود فسفر در مقایسه با عدم کاربرد آن، میزان جذب فسفر دانه را ۵۱/۸۴ درصد افزایش داد (جدول ۷).

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر تنش شوری، سطوح فسفر و کاربرد کود فسفر بر میزان جذب فسفر کل گیاه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بودند. علاوه بر این، اثر متقابل تنش شوری در فسفر نیز در سطح احتمال ۱ درصد بر جذب فسفر کل گیاه معنی‌دار به‌دست آمد (جدول ۶). شوری شدید منجر به کاهش ۲۲/۷۶ درصد میزان جذب فسفر کل گیاه در مقایسه با شوری متوسط شد (جدول ۷). نتایج نشان داد که در بین خاک‌های مورد آزمایش، S5 بالاترین جذب فسفر دانه (۳۵/۹۶ میلی‌گرم در گلدان) را داشت و خاک S1 با میزان جذب ۳۲/۹۹ میلی‌گرم در گلدان، کمترین میانگین این صفت را نشان داد (جدول ۷). کاربرد کود فسفر منجر به افزایش میانگین این صفت (۵۴/۲۲ درصد) در مقایسه با تیمارعدم کاربرد کود فسفر گردید (جدول ۷).

حد بحرانی فسفر در خاک و گیاه

به منظور تعیین حد بحرانی فسفر در خاک و گیاه از روش گرافیکی کیت نلسون استفاده شد. نتایج آنالیز این بخش در شکل ۱ و جدول ۹ برای خاک و گیاه براساس عملکرد نسبی دانه ارائه شده است. براساس این نتایج و براساس عملکرد نسبی دانه حد بحرانی فسفر برای خاک‌های با شوری متوسط، ۸/۹ میلی‌گرم در کیلوگرم به‌دست آمد.

افزایش شوری خاک، حد بحرانی فسفر را به ۱۳/۸ میلی‌گرم در کیلوگرم در خاک افزایش داد این موضوع در مورد حد بحرانی فسفر در گیاه نیز صادق بود. به‌طوری که حد بحرانی فسفر برگ براساس عملکرد نسبی دانه برای شرایط شوری متوسط ۱/۹ گرم بر کیلوگرم و برای شرایط شوری شدید۲/۲۵ گرم بر کیلوگرم به‌دست آمد.

جدول (٦) تجزیه واریانس غلظت و جذب فسفر در اندام‌های مختلف گیاه کینوا تحت تأثیر تیمارهای شوری، سطوح فسفر **و کاربرد فسفر**

Table (6) Analysis of variance of phosphorus uptake traits and phosphorus concentration in different organs of quinoa plant under the influence of salinity treatments, soil p and phosphorus application

		(Mean Square)میانگین مربعات					
منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	غلظت فسفر برگ Leave P concentration	غلظت فسفر دانه Seed P concentration	غلظت فسفر اندام هوایی Shoot P concentration	جذب فسفر اندام هوایی Shoot Phosphorus uptake	جذب فسفر دانه Seed Phosphorus uptake	جذب فسفر کل گیاه Plant Phosphorus uptake
شوری Salinity	1	0.085^{**}	0.009^{**}	0.001^{ns}	121.72^{**}	1617.74^{**}	2626.19^{**}
سطوح فسفر Soil P	9	0.005^{**}	0.005^{**}	0.004^{**}	10.38^{**}	66.44^{**}	108.34^{**}
کاربرد فسفر P application	1	0.02^{**}	1.186^{**}	0.228^{**}	712.61^{**}	14808.82^{**}	22018.47^{**}
شوری × سطوح فسفر Salinity×Soil P	9	0.004^{**}	0.004^{**}	0.002^{**}	4.86^{*}	44.28^{ns}	57.67^{ns}
شوری × فسفر Salinity×P application	1	0.051^{**}	0.0054^{**}	0.0002^{ns}	36.98^{**}	76.03^{ns}	219.05^{**}
سطوح فسفر × فسفر P application× Soil P	9	0.002	0.003^{*}	0.003^{**}	8.43^{**}	18.97^{ns}	28.37^{ns}
شوری× سطوح فسفر×فسفر P application× Soil P× Salinity	9	0^{**}	0.001^{*}	0.002^{**}	4.73^{*}	16.37^{ns}	18.81^{ns}
خطا Error	80	0.001	0.001	0.001	2.1	23.03	30.39
ضریب تغییرات (٪) CV		11.93	9.13	26.47	20.99	15.12	15.13

^{ns}، * و ** به ترتیب بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار و اختلاف معنی‌دار در سطح پنج و یک درصد می‌باشد.

ns, *, and ** indicate no significant difference and significant difference at the 5 and 1 percent levels, respectively.

جدول (۷) مقایسه میانگین اثر اصلی شوری، سطوح فسفرو کاربرد فسفر بر صفات جذب فسفر و غلظت فسفر در اندام‌های مختلف گیاه کینوا

Table (7) Comparison of the average main effect of salinity, soil P and phosphorus application on phosphorus uptake traits and phosphorus concentration in different organs of quinoa plant

جذب فسفر کل گیاه	جذب فسفر دانه	جذب فسفر اندام هوایی	غلظت فسفر اندام هوایی	غلظت فسفر دانه	غلظت فسفر برگ	تیمار (Treatment)
Plant Phosphorus uptake (mg pot^{-1})	Seed Phosphorus uptake (mg pot^{-1})	Shoot Phosphorus uptake (mg pot^{-1})	Shoot P concentration (%)	Seed P concentration (%)	Leave P concentration (%)	تنش شوری (dS m^{-1}) Salt stress
41.11±2.13a	35.42±1.72a	5.69±0.48a	0.09±0.01a	0.38±0.01a	0.16±0.01b	6
31.75±1.73b	28.08±1.46b	3.67±.32b	0.08±0.01a	0.37±0.01b	0.22±0.01a	12
						Soil P سطوح فسفر
32.99±4.06c	32.94±3.61bc	3.35±0.61d	0.06±0.01e	0.35±0.03d	0.22±0.01a	S1
38.74±4.82ab	32.94±3.62ab	5.81±1.34ab	0.1±0.02ab	0.38±0.03bcd	0.21±0.01ab	S2
38.51±4.17ab	33.46±3.37ab	5.05±0.9abc	0.1±0.02bc	0.38±0.03a-d	0.22±0.01a	S3
38.4±5.55ab	32.99±4.37ab	5.41±1.21ab	0.1±0.02ab	0.4±0.03ab	0.18±0.02cd	S4
42.1±4.71a	35.96±3.65a	6.14±1.11a	0.12±0.02a	0.41±0.03a	0.18±0.01cde	S5
35.07±5.03bc	30.51±4.34bc	4.56±0.81bcd	0.09±0.01bcd	0.35±0.03d	0.19±0.02bc	S6
32.17±4.33c	27.34±3.38c	4.83±1.08bc	0.09±0.02bc	0.36±0.04cd	0.19±0.02bcd	S7
36.17±4.49bc	32.23±3.88ab	3.94±0.7cd	0.08±0.01cde	0.39±0.04abc	0.17±0.01de	S8
35±4.65bc	31.04±3.94bc	3.96±0.78cd	0.07±0.01de	0.36±0.03d	0.16±0.02e	S9
35.15±4.25bc	31.38±3.7bc	3.76±0.74cd	0.08±0.01cde	0.38±0.03bcd	00.17±0.01de	S10
						فسفر P application
22.88±0.65b	20.64±0.6b	2.24±0.1b	0.04±0b	0.28±0.01b	0.18±0.01b	عدم کاربرد without P application
49.98±1.27a	42.86±1.0a	7.12±0.39a	0.13±0.01a	0.48±.01a	0.20±0.01a	کاربرد P application

کاربرد فسفر: ۹ میلی گرم فسفر در هر کیلوگرم خاک، عدم کاربرد: عدم مصرف فسفر

P application: 9 (mg/kg) phosphorus of soil, Without P application: No phosphorus application

جدول (۸) مقایسه میانگین اثر متقابل تنش شوری، سطوح فسفر **و کاربرد فسفر بر برخی صفات جذب فسفر و غلظت فسفر گیاه کینوا**

Table (8) Comparison of the average interaction effect of salinity stress, soil P and phosphorus application on some phosphorus uptake traits and phosphorus concentration of quinoa plant

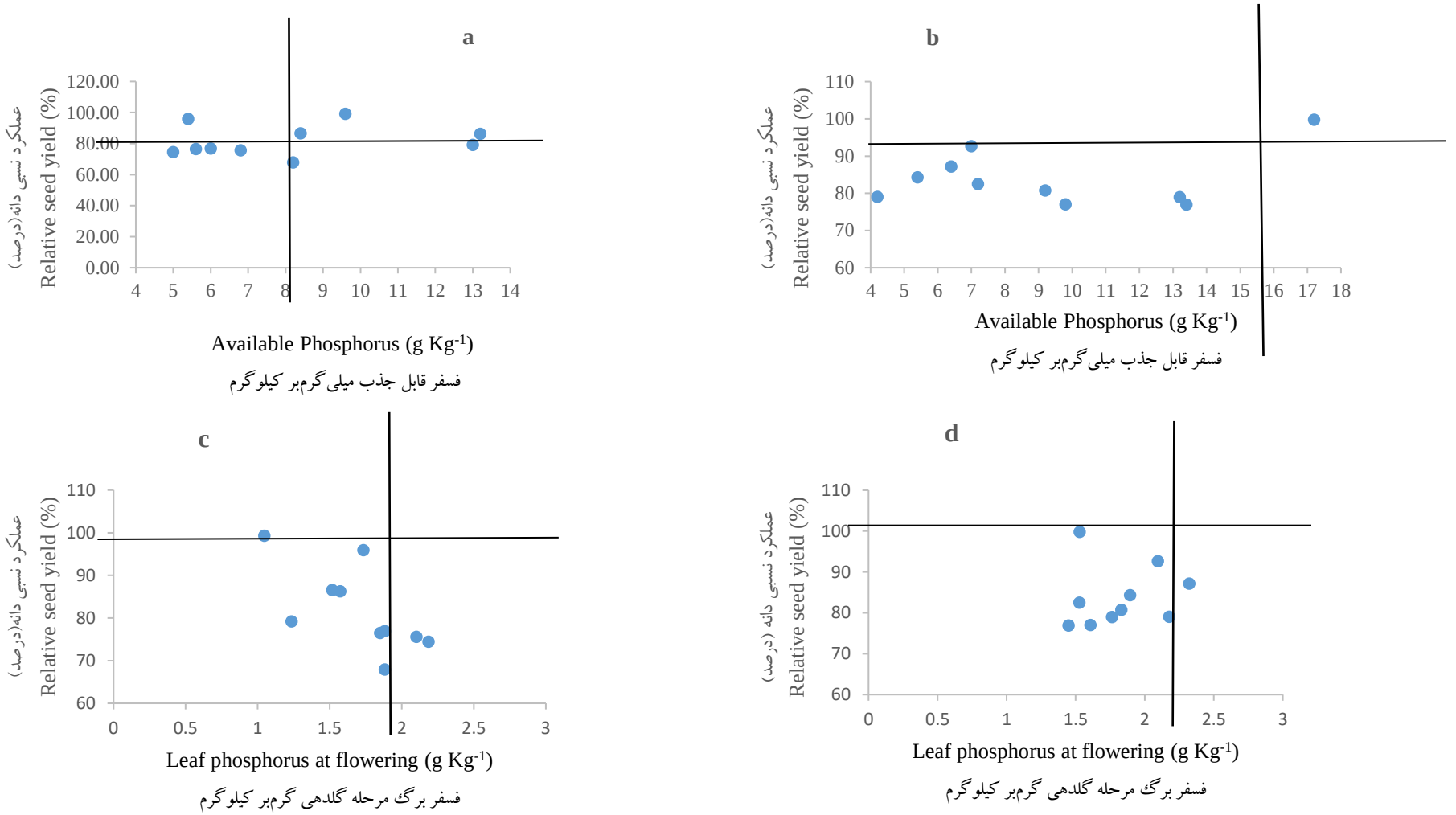
شوری (dS m^{-1}) Salinity	سطوح فسفر Soil P	کاربرد فسفر P application	شاخص برداشت Harvest Index (%)	غلظت فسفر برگ Leave P concentration (%)	غلظت فسفر دانه Seed P concentration (%)	غلظت فسفر اندام هوایی Shoot P concentration (%)	جذب فسفر اندام هوایی Shoot Phosphorus uptake (mg pot^{-1})	زیست توده (گرم در گلدان) Biomass (g pot^{-1})
۶ دسی زیمنس بر متر 6 dS/m	S1	عدمWithout	40.1±4.1g	0.219±0.11d-h	0.278±0.004hij	0.054±0.009ghi	3.3±0.43j-m	18.32±1.69b-g
		کاربردWhit	51.2±0.4b-f	0.185±0.019g-k	0.467±0.004a-e	0.096±0.025d-g	5.77±1.49f-j	18.95±0.59a-f
	S2	عدمWithout	50.3±0.6b-f	0.173±0.003i-m	0.283±0.005h-k	0.044±0.009hi	2.38±0.45klm	17.88±0.25c-h
		کاربردWhit	48.5±1.7c-f	0.182±0.006h-k	0.502±0.018abc	0.198±0.018a	12.79±1.13a	19.35±0.42a-e
	S3	عدمWithout	48.2±1.5c-f	0.185±0.007g-k	0.282±0.005h-k	0.046±0.003hi	2.64±0.32klm	16.77±0.82e-j
		کاربردWhit	50.3±0.9b-f	0.163±0.002j-n	0.445±0.019cde	0.102±0.018def	6.91±1.19d-h	20.96±1.05ab
	S4	عدمWithout	47.1±2.8d-g	0.104±0.004o	0.301±0.007g-j	0.045±0.002hi	2.47±0.24klm	16.29±0.28f-k
		کاربردWhit	50.1±2.2b-f	0.188±0.011g-k	0.507±0.034abc	0.17±0.028ab	10.63±2.34ab	19.8±1.74a-e
	S5	عدمWithout	46.5±0.9d-g	0.21±0.007e-i	0.36±0.008fg	0.057±0.008ghi	3.41±0.36j-m	17.39±0.7d-h
		کاربردWhit	51.1±0.8b-f	0.194±0.037f-j	0.48±0.031a-d	0.167±0.002ab	10.7±1.32ab	20.91±0.99ab
	S6	عدمWithout	45.7±2.1efg	0.188±0.012g-k	0.287±0.025hij	0.061±0.005f-i	3.51±0.13i-m	16.29±0.99f-k
		کاربردWhit	50.7±2.4b-f	0.131±0.009mno	0.463±.012b-e	0.123±0.015cde	8.78±1.19bcd	21.71±0.87a
	S7	عدمWithout	47.8±1.1c-f	0.152±0.009j-n	0.263±0.029ijk	0.056±0.001ghi	2.86±0.18klm	14.93±0.6h-p
		کاربردWhit	48.1±0.2c-f	0.148±0.007k-o	0.467±0.038a-e	0.169±0.032ab	9.93±2.03bc	17.18±0.42d-i
	S8	عدمWithout	47.1±2.3d-g	0.105±0.008o	0.242±0.01ijk	0.032±0.003i	2.06±0.08lm	20.02±1.3a-d
		کاربردWhit	51.6±1.4b-f	0.179±0.018h-l	0.497±0.014abc	0.098±0.018d-g	6.17±1.32d-i	18.41±1.2b-g
	S9	عدمWithout	45.1±1.2fg	0.124±0.01no	0.286±0.026hij	0.033±0.001i	2.07±0.17lm	17.42±1.41d-h
		کاربردWhit	50±2.2b-f	0.12±0.012no	0.46±0.015b-e	0.129±0.011bcd	7.9±0.8c-f	19.79±1.41a-e

۱۲۱۲ دسی زیمنس بر متر dS/m

S10	عدمWithout	47.8±2.3c-f	0.157±0.007j-n	0.331±0.018gh	0.037±0.002hi	2.26±0.05klm	18.33±0.91b-g
	کاربردWhit	49.5±2b-f	0.137±0.006l-o	0.488±0.02a-d	0.11±0.024de	7.21±1.34d-g	20.47±1.54abc
S1	عدمWithout	52.2±1.5b-f	0.218±0.019d-h	0.251±0.008ijk	0.032±0.003i	1.33±0.14m	13.14±0.38l-p
	کاربردWhit	53.7±0.7bcd	0.254±0.014a-d	0.404±0.044ef	0.061±0.014f-i	3±0.8klm	16.15±0.69f-l
S2	عدمWithout	48.4±4.6c-f	0.189±0.004f-k	0.251±0.008ijk	0.039±0.002hi	2.12±0.26lm	14.85±1.1h-p
	کاربردWhit	52.6±0.6b-f	0.284±0.02ab	0.48±0.023a-d	0.12±0.018cde	5.94±0.8e-j	16.32±0.67f-k
S3	عدمWithout	51.8±1.1b-f	0.232±0.008c-f	0.305±0.015ghi	0.046±0.003hi	2.03±0.07lm	14.27±1.05i-p
	کاربردWhit	55±1.4bc	0.286±0.017a	0.497±0.014abc	0.189±0a	8.63±0.82b-e	15.4±0.74g-n
S4	عدمWithout	52.4±3.5b-f	0.21±0.011e-i	0.288±0.016hij	0.044±0.002hi	1.73±0.07lm	12.97±0.67m-p
	کاربردWhit	52.9±0.8b-e	0.237±0.023cde	0.524±0.015ab	0.157±0.019abc	6.8±0.88d-h	13.8±0.56j-p
S5	عدمWithout	52.4±0.3b-f	0.153±0.014j-n	0.289±0.005hij	0.051±0.001hi	2.1±0.05lm	13.51±0.34k-p
	کاربردWhit	54.7±0.7bc	0.162±0.007j-n	0.506±0.021abc	0.193±0.013a	8.36±0.53b-f	15.67±0.16g-m
S6	عدمWithout	50±0.2b-f	0.183±0.005h-k	0.214±0.014k	0.06±0.017f-i	2.55±0.94klm	12.96±1.04m-p
	کاربردWhit	69.6±7.7a	0.27±0.014abc	0.45±0.024cde	0.098±0.004d-g	3.39±0.26j-m	11.8±1.17p
S7	عدمWithout	48.9±2.2c-f	0.161±0.007j-n	0.243±0.017ijk	0.038±0.006hi	1.44±0.16lm	12.25±0.79op
	کاربردWhit	51.4±1.2b-f	0.291±0.019a	0.48±0.021a-d	0.107±0.013de	5.08±0.82g-k	15.18±0.73h-o
S8	عدمWithout	49±1.9c-f	0.176±0.015h-l	0.287±0.015hij	0.041±0.005hi	1.66±0.26lm	12.48±0.28nop
	کاربردWhit	51.5±1.4b-f	0.228±0.007c-g	0.531±0.037a	0.132±0.011bcd	5.88±0.42e-j	15.06±0.72h-o
S9	عدمWithout	51.1±0.9b-f	0.145±0.007k-o	0.235±0.014jk	0.037±0.002hi	1.6±0.11lm	13.51±0.12k-p
	کاربردWhit	52.7±1.2b-e	0.244±0.013b-e	0.443±0.001cde	0.082±0.006e-h	4.27±0.53h-l	17.04±0.16d-i
S10	عدمWithout	51.6±1.3b-f	0.153±0.011j-n	0.255±0.019ijk	0.034±0.001i	1.37±0.05lm	13.42±0.49k-p
	کاربردWhit	56.6±0.5b	0.232±0.008c-f	0.426±0.008de	0.128±0.019bcd	4.21±0.4h-m	12.24±0.77op

کاربرد فسفر: ۹ میلی گرم فسفر در هر کیلوگرم خاک، عدم کاربرد: عدم مصرف فسفر

P application: 9 (mg/kg) phosphorus of soil, Without P application: No phosphorus application



شکل (۱۰) حد بحرانی فسفر در دو شرایط شوری ٦ دسی‌زیمنس‌برمتر درخاک (a) و برگ (c) و شوری ۱۲ دسی‌زیمنس‌برمتر در خاک (b) و برگ (d) در گیاه کینوا

Figure (10) Critical phosphorus limit in two salinity conditions of 6 dS/m in soil (a) and leaves (c) and 12 dS/m in soil (b) and leaves (d) in quinoa plant.

جدول (۹) حد بحرانی فسفر برای خاک و گیاه کینوا در دو شرایط شور و غیر شور براساس پارامترهای مختلف
Table (9) Critical phosphorus limit for soil and quinoa plant in saline and non-saline conditions based on different parameters

	فسفر خاک (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Soil P (mg Kg^{-1})		فسفر گیاه (گرم بر کیلوگرم) Plant P (g Kg^{-1})	
	6 dS m^{-1}	12 dS m^{-1}	6 dS m^{-1}	12 dS m^{-1}
عملکرد نسبی دانه Seed relative Yield	8.9	13.8	1.9	2.25
عملکرد نسبی بیوماس Biomass relative yield	9.9	13.9	2.1	2.25
شاخص برداشت نسبی Harvest index relative yield	9.9	13.6	2.1	2.38

از آنجا که فسفر به شدت با ترکیبات خاک واکنش نشان می‌دهد و خصوصاً در خاک‌های آهکی غیرمتحرک است، بیشتر از طریق انتشار و تماس مستقیم ریشه جذب می‌شود. به همین دلیل، ریشه گیاه باید در خاک به‌گونه‌ای رشد کند که بتواند فسفر مورد نیاز خود را جذب کند. فسفر به‌سرعت از سطح ریشه جذب می‌شود و به همین خاطر، ناحیه‌ای به شعاع ۰/۵ تا یک میلی‌متر اطراف ریشه معمولاً فاقد فسفر است. بنابراین، استفاده از کودهای فسفری در ناحیه ریزوسفر گیاه در طول دوره رشد توصیه می‌شود (۴۵, ۴۶). در پژوهش حاضر براساس عملکرد نسبی دانه، حد بحرانی فسفر برای خاک‌های غیر شور ۸/۹ میلی‌گرم در کیلوگرم به‌دست آمد. افزایش شوری خاک، حد بحرانی فسفر را نیز در خاک افزایش داد و حد بحرانی را به ۱۳/۸ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک رساند. به‌طور کلی، حد بحرانی فسفر به میزانی از فسفر در خاک یا گیاه گفته می‌شود که در بالاتر از آن، عملکرد گیاه بهینه است و در پایین‌تر از آن، محدودیت عناصر غذایی وجود دارد. در شرایط شوری، افزایش حد بحرانی فسفر نشان می‌دهد که گیاه برای دستیابی به همان سطح عملکرد به فسفر بیشتری نیاز دارد. این موضوع به دلیل تغییرات فیزیولوژیکی و شیمیایی ناشی از شوری است که قابلیت جذب فسفر توسط ریشه‌ها را کاهش می‌دهد. افزایش حد بحرانی فسفر در شرایط شوری به دلایل متعددی رخ می‌دهد. شوری خاک معمولاً تعادل یونی اطراف ریشه را مختل کرده و جذب عناصر مغذی مانند فسفر را تحت تأثیر قرار می‌دهد، به‌طوری که حضور مقادیر زیاد سدیم (Na^+) و کلر (Cl^-) در محیط ریشه می‌تواند با فسفات‌ها رقابت کرده و جذب آن‌ها را کاهش دهد (۴۷). علاوه بر این، در شرایط شور، افزایش یون‌های سدیم و کلسیم ممکن است موجب تثبیت بیشتر فسفر در خاک شده و دسترسی آن را برای گیاه کاهش دهد (۳۴). از سوی دیگر، شوری می‌تواند متابولیسم گیاه را به گونه‌ای تغییر دهد که گیاه به فسفر بیشتری برای حفظ فرایندهای فیزیولوژیکی، از جمله فتوسنتز و تولید انرژی، نیاز داشته باشد (۴۸). نتایج حد بحرانی نشان داد که نیاز فسفر کینوا نسبت به سایر گیاهان کمتر است. برای اکثر گیاهان زراعی، حد بحرانی فسفر در خاک بین ۱۲ تا ۱۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم (بر اساس روش اولسن) در نظر گرفته می‌شود. برای گیاهانی مانند لوبیا و ذرت، مطالعات منطقه‌ای ممکن است عدد دقیق‌تری ارائه دهند (مثلاً ۱۳ برای لوبیا (۴۹) و ۱۸/۵ برای ذرت (۵۰, ۵۱)) و در شالیزارها (برنج)، حد بحرانی فسفر با روش اولسن حدود ۱۶ میلی‌گرم در

کیلوگرم گزارش شده است (۵۲). حد بحرانی برای درختان میوه معمولاً کمتر است، اما توصیه کودی برای این گروه اغلب بر مبنای تجزیه برگ صورت می‌گیرد. در شرایط دیم مراکش داده‌های جذب مواد مغذی نشان داد که کینوا برای تولید ۱ تن عملکرد دانه به ۶۰ کیلوگرم N ، ۲۶ کیلوگرم P_2O_5 و ۲۰۵ کیلوگرم K_2O نیاز دارد (۵۳). برای تولید یک تن زیست‌توده کینوا (شامل دانه‌ها، ساقه‌ها و برگ‌ها) به ترتیب ۱۲/۷، ۱/۶ و ۳۵/۵ کیلوگرم در هکتار از نیتروژن، فسفر و پتاسیم باید به خاک اضافه شود. در حالی که نیتروژن و پتاسیم به مقدار متوسط تا نسبتاً زیاد مورد نیاز هستند، فسفر به مقدار کمتری مورد نیاز است (۵۴). نیاز کمتر کینوا به فسفر می‌تواند به دلیل سیستم ریشه‌ای کارآمدتر، یا ویژگی‌های ژنتیکی آن در جذب و استفاده بهینه از فسفر باشد. بررسی بیان ژن‌ها در شرایط کمبود فسفر و شوری نیاز به بررسی دارد. ژن‌هایی که در تنش همزمان فسفر و شوری بیان می‌شود در میزان تحمل گیاه به تنش شوری و جذب کارآمد فسفر موثر هستند. در شرایط کمبود مواد مغذی، گیاهان صرف نظر از اینکه دو لپه‌ای یا علفی باشند، تمایل به ایجاد سیستم استخوان شاه‌ماهی[1] دارند. این سیستم ریشه‌ای رقابت بین ریشه‌های یک گیاه و همچنین بین ریشه‌های گیاهان همسایه را محدود می‌کند. این سیستم ریشه‌ای و جمعیت میکروبی منطقه توسعه ریشه گیاه کینوا به بهبود بهره‌برداری از آب و مواد مغذی محدود موجود در خاک کمک می‌کند. علاوه بر این، اکوتیپ‌های کینوا که در شرایط خشک رشد می‌کنند، تمایل به ایجاد محور اصلی ریشه قوی و عمیق برای کاوش لایه‌های عمیق خاک برای دسترسی به آب و مواد غذایی دارند (۵۵). ژن‌های HvPIP و PHO1 در شرایط کمبود فسفر به تنهایی و تنش شوری و یا خشکی به همراه کمبود فسفر بیشتر بیان می‌شوند و موجب مقاومت به تنش می‌گردد (۴۳).

نتیجه گیری

کاربرد کود فسفر اثرات مثبتی بر صفات رشدی و عملکرد نشان داد. بیشترین تأثیر مثبت فسفر در خاک‌هایی با شوری ۶ دسی‌زیمنس‌برمتر مشاهده شد. فسفر اولیه خاک نیز نقش مهمی در تعیین میزان تأثیر شوری و فسفر داشت. حد بحرانی فسفر برای خاک‌های با شوری ۶ و ۱۲دسی‌زیمنس‌برمتر و بالا به ترتیب ۸/۹ و ۱۳/۸ میلی‌گرم در کیلوگرم و براساس فسفر برگ ۱/۹ و۲/۲۵ گرم بر کیلوگرم به‌دست آمد. به‌طور کلی، این نتایج نشان داد که مدیریت بهینه کوددهی فسفر موجب بهبود رشد و عملکرد گیاه کینوا، بهبود تخصیص فسفر به دانه‌ها و حفظ عملکرد و کیفیت محصول در سیستم‌های کشت خاکی در شرایط شور می‌شود.

---

۱ – سیستم ریشه شاه ماهی (herringbone root system) نوعی معماری ریشه است که با یک محور ریشه اصلی با ریشه‌های جانبی کوچکتر متعدد که با زاویه‌ای منشعب می‌شوند، شبیه الگوی استخوان ماهی جناغی یا دندانه‌های شانه است. این الگوی شاخه‌بندی اغلب در گیاهانی که در شرایط خاک‌های فقیر رشد می‌کنند، یافت می‌شود.

References

1. Moameni, A. 2011. Geographical Distribution and Salinity Levels of Soil Resources of Iran. Iranian Journal of Soil Research, 24(10):203-215. [In Persian with English Abstract]
2. Kumar, G. and Kumar, A. 2019. Salinity stress in crop plants: Mechanism and management. Think India Journal, 22:1197-1201.
3. Adolf, V.I., Jacobsen, S.E., and Shabala, S. 2012. Salt tolerance mechanisms in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). Environmental and Experimental Botany, 92:43-54. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.04.011.
4. Maradini-Filho, A. 2017. Quinoa: nutritional aspects. Journal of Nutraceuticals and Food Science, 2(1:3): 1-5.
5. Abdellatif, A.S.A. 2018. Chemical and technological evaluation of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) cultivated in Egypt. Acta Scientific Nutritional Health, 2(7):42-53.
6. Iranshahr, E. and Sepehr, E. 2012. Evaluation of phosphorus acquisition and utilization efficiency of wheat genotypes in rock phosphate. [In Persian with English Abstract]
7. Hopkins, B. and Ellsworth, J. Year. Phosphorus nutrition in potato production. Idaho Potato Conference.
8. Malhi, S., Haderlein, L., Pauly, D., and Johnston, A. 2002. Improving fertilizer phosphorus use efficiency. Journal of land Management (Soil and Water sci.), 8 (2):1-11. [In Persian with English Abstract].
9. Vance, C.P., Uhde-Stone, C., and Allan, D.L. 2003. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. New Phytologist, 157(10):423-447. https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00726.x.
10. Shahbazi, N., Kiani, G., Pakdin Parizi, A., and Mehraban Joubani, P. 2021. Physiological and biochemical responses of different sesame (*Sesamum indicum* L.) genotypes under salinity stress. Plant Process and Function, 10(45): 207-234. [In Persian with English Abstract].
11. Mallarino, A. and Blackmer, A. 1992. Comparison of methods for determining critical concentrations of soil test phosphorus for corn. Agronomy Journal, 84(10):850-856. https://doi.org/10.2134/agronj1992.00021962008400050022x.
12. Simard, R.R. and Tran, T.S. 1993. Evaluating Plant-available Phosphorus with the Electro-Ultrafiltration Technique. Soil Science Society of America Journal, 57(2):404-409. https://doi.org/10.2136/sssaj1993.03615995005700020032x.
13. Cate Jr, R.B. and Nelson, L.A. 1971. A simple statistical procedure for partitioning soil test correlation data into two classes. Soil Science Society of America Journal, 35(4):658-660. https://doi.org/10.2136/sssaj1971.03615995003500040019x.
14. Gee, G. and Bauder, J. 1979. Particle size analysis by hydrometer: a simplified method for routine textural analysis and a sensitivity test of measurement parameters. Soil Science Society of America Journal, 43(10):1004-1007. https://doi.org/10.2136/sssaj1979.03615995004300050028x.
15. Thomas, G.W. 1996. Soil pH and soil acidity. *Methods of Soil Analysis*: Part 3 Chemical Methods, 5:475-490.
16. Rhoades, J. 1996. Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. *Methods of Soil Analysis*: Part 3 Chemical Methods, 5:417-435.
17. Walkley, A. and Black, I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science, 37(10):29-38. https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003.
18. Olsen, S.R. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. US Department of Agriculture. Circular. No. 939
19. Ali Ehyaei, M. and Asgharzadeh, A.A. 1993. Description of methods for chemical analysis of soil, Volume 1, Publication No. 893, Soil and Water Research Institute. [In Persian]

20. Shahabi, A.A. and J., M.Malakoti. 1995. Determination of phosphorus fertilizer equivalent in calcareous soils with different amounts of clay. Master's thesis, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University. (In Persian)

21. Hasheminejhad, Y. and Gholami Touran Poshti, M. 2008. Introducing an appropriate packing method in disturbed soil columns and its verification to achieve a homogeneous porous media. Water and Soil, 22(2). [In Persian]

22. Anagholi, A. and Ranjbar, Gh. 2019. Principles and Methods of Salinity Stress Tests in Agricultural Research, ed. 55810. Agricultural Research, Education and Promotion Organization. [In Persian]

23. Beyrami, H., Rahimian, M.H., Salehi, M., Yazdani-Biouki, R., Pirasteh-Anosheh, H., and Shiran-Tafti, M. 2024. Determination of Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) crop coefficient and water requirement in lysimetric condition. Iranian Journal of Irrigation & Drainage, 17(10):967-978. [In Persian with English Abstract]

24. Sosa-Zuniga, V., Brito, V., Fuentes, F., and Steinfort, U. 2017. Phenological growth stages of quinoa (*Chenopodium quinoa*) based on the BBCH scale. Annals of Applied Biology, 171(10):117-124. https://doi.org/10.1111/aab.12387.

25. Wallinga, I., Van Vark, W., Houba, V., and Van der Lee, J. 1989. *Soil and plant analysis*, series of syllabi part 7, Plant analysis procedure. Wageningen Agriculture University, Wageningen, 7:197-200.

26. Nelson, R. 1982. Carbonate and gypsum. *Methods of Soil Analysis*: Part 2 Chemical and Microbiological Properties, 9:181-197.

27. Bouras, H., Choukr-Allah, R., Amouaouch, Y., Bouaziz, A., Devkota, K.P., El Mouttaqi, A., Bouazzama, B., and Hirich, A. 2022. How does quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) respond to phosphorus fertilization and irrigation water salinity? Plants, 11(2):216. https://doi.org/10.3390/plants11020216.

28. Bouras, H., Bouaziz, A., Bouazzama, B., Hirich, A., and Choukr-Allah, R. 2021. How phosphorus fertilization alleviates the effect of salinity on sugar beet (*Beta vulgaris* L.) productivity and quality. Agronomy, 11(8):1491. https://doi.org/10.3390/agronomy11081491.

29. Shahverdi, M.A., Omidi, H., and Tabatabaei, S.J. 2019. Stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni) responses to NaCl stress: Growth, photosynthetic pigments, diterpene glycosides and ion content in root and shoot. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 18(4):355-360. https://doi.org/10.1016/j.jssas.2018.02.007.

30. Hozayn, M., Mohamed, E.-S., and El-Mahdy, A.A. 2024. Salinity Stress Implication on Vegetation, Anatomy and Yield of Some (*Chenopodium quinoa* Willd.) Varieties using Magnetized Water Technology. Egyptian Journal of Chemistry, 67(8):635-646.

31. Lyu, J., Aiwaili, P., Gu, Z., Xu, Y., Zhang, Y., Wang, Z., Huang, H., Zeng, R., Ma, C., and Gao, J. 2022. Chrysanthemum MAF2 regulates flowering by repressing gibberellin biosynthesis in response to low temperature. The Plant Journal, 112(10):1159-1175. https://doi.org/10.1111/tpj.15699.

32. Derbali, I., Derbali, W., Gharred, J., Manaa, A., Slama, I., and Koyro, H.-W. 2023. Mitigating salinity stress in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) with biochar and superabsorber polymer amendments. Plants, 13(10):92. https://doi.org/10.3390/plants13010092.

33. Naz, M., Hussain, S., Ashraf, I., and Farooq, M. 2023. Exogenous application of proline and phosphorus help improving maize performance under salt stress. Journal of Plant Nutrition, 46(10):2342-2350. https://doi.org/10.1080/01904167.2023.2203387.

34. Dey, G., Banerjee, P., Sharma, R.K., Maity, J.P., Etesami, H., Shaw, A.K., Huang, Y.-H., Huang, H.-B., and 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. https://doi.org/10.3390/agronomy11081552.

35. Jahan, M.N., Barua, S., Ali, H., Ali, M.N., Chowdhury, M.S.H., Hasan, M.M., Ferdous, T., Eti, F.S., Khayer, A., and Hossen, K. 2020. Effects of phosphorus fertilization on hybrid varieties of mungbean [*Vigna radiata* (40) Wilczek] in a salinity prone area of the subtropics. Acta Agrobotanica, 73(10). https://doi.org/10.5586/aa.2020.031.

36. Gulmezoglu, N. and Daghan, H. 2017. The interactive effects of phosphorus and salt on growth, water potential and phosphorus uptake in green beans. Applied Ecology & Environmental Research, 15(10). https://doi.org/10.15666/aeer/1503_20822088.

37. Sadji-Ait Kaci, H., Chaker-Haddadj, A., and Aid, F. 2017. Interactive effects of salinity and two phosphorus fertilizers on growth and grain yield of *Cicer arietinum* L. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science, 67(10):208-216. https://doi.org/10.1080/09064710.2016.1247043.

38. Abd El-Hamed, E., Metwally, S., Matar, M., and Yousef, N. 2012. Impact of phosphorus fertilization in alleviating the adverse effects of salinity on wheat grown on different soil types. Acta Agronomica Hungarica, 60(10):265-281. https://doi.org/10.1556/AAgr.60.2012.3.5.

39. Malhotra, H., Vandana, Sharma, S., and Pandey, R. 2018. Phosphorus nutrition: plant growth in response to deficiency and excess. Plant Nutrients and Abiotic Stress Tolerance, 171-190.

40. Saadat, S., Esmail Nejad, L., and Tadayonnejad, M. 2023. The effect of phosphorus in reducing the effect of salinity on wheat yield at different growth stages. Haloculture, 1(10):42-53. [In Persian with English Abstract]

41. Mohammadi, A., Bahmanyar, M., and Ghajar Sepanlou, M. 2013. Application of gypsum and manure on improving the amount of nitrogen, phosphorus and potassium in leaves and seeds of wheat under salinity stress. Agricultural Engineering, 36(10):1-11.

42. Zhao, D.-Y., Zhang, X.-L., Zhao, S.-P., Liu, G.-L., Zhang, Z.-W., Zhao, W.-F., Li, X.-P., Ali Khan, S., and Siddique, K.H. 2023. Biomass allocation and nutrients utilization in wheat as affected by phosphorus placement and salt stress. Agronomy, 13(6):1570. https://doi.org/10.3390/agronomy13061570.

43. Bechtaoui, N., Rabiu, M.K., Raklami, A., Oufdou, K., Hafidi, M., and Jemo, M. 2021. Phosphate-Dependent Regulation of Growth and Stresses Management in Plants. Frontiers in Plant Science, 12:679916. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.679916

44. Su, R., Zhang, Z., Chang, C., Peng, Q., Cheng, X., Pang, J., He, H., and Lambers, H. 2022. Interactive effects of phosphorus fertilization and salinity on plant growth, phosphorus and sodium status, and tartrate exudation by roots of two alfalfa cultivars. Annals of Botany, 129(10):53-64. https://doi.org/10.1093/aob/mcab127.

45. Tadayonnejad, M., Dehqani, M., and Parsadoust, F. 2021. Effect of salinity stress and phosphorus application in different stages of wheat growth on biomass and some of its physiological characteristics. Plant Process and Function, 10(44):119-132.

46. Młodzińska, E. and Zboińska, M. 2016. Phosphate uptake and allocation–a closer look at Arabidopsis thaliana L. and Oryza sativa L. Frontiers in Plant Science, 7:1198. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01198.

47. Storey, R., Schachtman, D., and Thomas, M. 2003. Root structure and cellular chloride, sodium and potassium distribution in salinized grapevines. Plant, Cell & Environment, 26(6):789-800. https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2003.00997.x.

48. Khan, F., Siddique, A.B., Shabala, S., Zhou, M., and Zhao, C. 2023. Phosphorus Plays Key Roles in Regulating Plants' Physiological Responses to Abiotic Stresses. Plants, 12. https://doi.org/10.3390/plants12152861.

49. Khodshenas, M.A., Ghadbeiklou, J., and Dadivar, M. 2019. Determination of Critical Level of Soil Phosphorus for Bean. Iranian Journal of Soil Research, 33(10):25-35.

50. Mostashari, M. 2014. Determining the critical limit and nutritional balance of phosphorus in corn crop. Proceedings of the 13th Iranian Soil Science Congress Sustainable Soil Sustainable Production. Ahvaz, Iran.

51. Reyhanitabar, A. 2014. Determination of Soil Phosphorus Critical Level for Corn Plant in East Azerbaijan Province. Water and Soil, 28(2):330-342. [In Persian with English Abstract].

52. Karimi Amir Kiasar, M., Kavoosi, M., and Shokri Vahed, H. 2013. Phosphorus Critical Concentration in Paddy Soils of Guilan Province. Water and Soil Science, 23(10):123-134. [In Persian with English Abstract].

53. Taaime, N., El Mejahed, K., Choukr-Allah, R., Bouabid, R., Oukarroum, A., and El Gharous, M. 2023. Optimization of macronutrients for improved grain yield of quinoa (*Chenopodium quinoa* Wild.) crop under semi-arid conditions of Morocco. Frontiers in Plant Science, 14:1146658. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1146658.

54. Alvar-Beltrán, J., Napoli, M., Dao, A., Amoro, O., Verdi, L., Orlandini, S., and Dalla Marta, A. 2021. Nitrogen, phosphorus and potassium mass balances in an irrigated quinoa field. Italian Journal of Agronomy, 16(10):1788. https://doi.org/10.4081/ija.2021.1788

55. Singh, S., Jain, A., and Varma, A. 2021. Root analysis of quinoa plant. *Biology and Biotechnology of Quinoa*: Super Grain for Food Security, 153-165.