نشریه علمی اکوفیزیولوژی گیاهان زراعی، جلد شانزدهم، شماره ۴(۶۴)، زمستان ۱۴۰۱، صفحه ۴۷۴-۴۵۳

مقاله پژوهشی DOI: 10.30495/JCEP.2023.1933283.1810

ارزیابی دینامیک رشد ریشه و مولفه‌های عملکرد ارقام کینوا (*Chenopodium quinoa*) با تغییر مقادیر فسفر و روی

انیسه جرفی[۱]، مجتبی علوی فاضل[۱*]، عبدالعلی گیلانی [۱و۲]، محمدرضا اردکانی[۳] و شهرام لک[۱]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۴/۲ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۸/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۲

چکیده

توزیع و پراکنش مناسب ریشه جذب عناصر غذایی را تسهیل نموده و منجر به بهبود عملکرد گیاهان زراعی می‌شود. این مطالعه با هدف ارزیابی ساختار ریشه و شاخساره ارقام کینوا در پاسخ به کاربرد عناصر فسفر و روی در مرکز تحقیقات، آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خوزستان به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی و با سه فاکتور شامل کاربرد کود شیمیایی سوپرفسفات تریپل در ۴ سطح (صفر، ۶، ۱۲ و ۱۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خاک)، محلول‌پاشی سولفات روی در ۳ مقدار (آب بدون سولفات روی (شاهد)، محلول‌پاشی با غلظت ۴ و ۸ در هزار) و سه رقم کینوا (Giza 1، Q26، Titicaca) در سه تکرار در گلدان اجرا شد. یافته‌ها نشان داد پارامترهای ریشه نظیر وزن خشک ریشه، عرض ریشه، قطر ریشه، فاصله اولین انشعاب تا نوک ریشه و نسبت وزن ریشه به اندام هوایی تحت تاثیر سطوح کود فسفره و ارقام کینوا قرار گرفت ($P\leq0.01$) و برگ‌پاشی سولفات روی تنها بر وزن خشک ریشه، عرض ریشه، فاصله اولین انشعاب تا نوک ریشه، چگالی ریشه، نسبت وزن ریشه به اندام هوایی و پارامترهای اندام هوایی اثر معنی‌دار ایجاد نمود. رقم Q26 به‌عنوان برترین رقم از نظر توسعه ساختار ریشه‌ای شناسایی شد که در سطوح کاربرد ۱۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خاک فسفر و غلظت ۴ در هزار سولفات روی بیشترین وزن خشک ریشه (۳/۲۳ گرم در بوته)، عرض ریشه (۱۸/۰۶ سانتی‌متر) و فاصله اولین انشعاب تا نوک ریشه (۵۳/۲۳) را دارا بود. در این سطوح مصرف عناصر، بیشترین تعداد دانه در بوته (۴۵۴۲) در رقم Q26 حاصل گردید. بر اساس نتایج این آزمایش، کاربرد بهینه عناصر با کاهش اثرات آنتاگونیسمی و افزایش اثرات سینرژیستی عناصر فسفر و روی منجر به توسعه ساختار ریشه‌ای، بهبود جذب عناصر و افزایش مولفه‌های تولید ارقام کینوا شد.

واژگان کلیدی: ریشه، تعداد دانه در بوته، سوپر فسفات تریپل، سولفات روی، ژنوتیپ، کینوا.

۱- گروه زراعت، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

۲ - بخش تحقیقات اصلاح و تهیه نهال بذر، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، سازمان تحقیقات و آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران.

۳- گروه زراعت، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران.

نگارنده‌ی مسئول mojtaba_alavifazel@yahoo.com

مقدمه

کینوا با نام علمی *Chenopodium quinoa* گیاهی دولپه‌ای، یک‌ساله، از تیره‌ی *Amaranthaceae* و زیرتیره‌ی *Chenopodiaceae*، بوده که بومی آمریکای جنوبی است (Garcia-Parra *et al.*, 2020). دانه کینوا حاوی مقادیر بالای پروتئین، اسیدهای آمینه ضروری و اسیدهای چرب اشباع نشده بوده و شاخص گلیسمی (GI) پایینی دارد. همچنین، حاوی ویتامین‌ها، مواد معدنی و سایر ترکیبات مفید و فاقد گلوتن است (Gordillo-Bastidas *et al.*, 2016; Golabi *et al.*, 2022). سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO) به‌دلیل ویژگی‌های استثنایی گیاه کینوا، آن را یکی از مهم‌ترین محصولات زراعی دانسته که نقشی اساسی در تأمین امنیت غذایی دارد (Mubarak and Janat, 2021).

در محصولات زراعی، رشد اندام‌های هوایی و زیرزمینی هماهنگ و وابسته است. هنگامی که مواد مغذی کافی از طریق ریشه جذب شده و در دسترس برگ قرار می‌گیرد، فتوسنتز افزایش یافته و کربوهیدرات کافی برای ریشه‌ها تضمین می‌کند (Bilalis *et al.*, 2019).

فسفر یکی از عناصر ضروری مورد نیاز گیاه بوده که شرایط خاک را برای رشد ریشه فراهم می‌کند. این عنصر رشد و جذب مواد مغذی را افزایش داده و باعث افزایش کارایی جذب مواد مغذی می‌شود. استفاده بهینه از کود فسفره باعث افزایش رشد ریشه، فعالیت ریشه و بهبود سطح تماس ریشه کینوا با خاک می‌شود. همچنین، توانایی آنتی اکسیدانی ریشه گیاهان را تقویت می‌کند (Pang *et al.*, 2017). به عبارت دیگر، علت اختلاف در جذب عناصر، در نتیجه داشتن تفاوت‌های مورفولوژیکی ریشه و اثر متقابل ریشه با خاک و میزان اولیه فسفر بذر می‌باشد و کمبود فسفر در ابتدای دوره رشد سبب ایجاد یک سیستم ریشه‌ای کم عمق با پراکنش کم شود (Tayafeh Soltankhani, 2011).

روی از دیگر عناصر تغذیه‌ای مورد نیاز گیاه است که در فرایندهای رشد و متابولیسم گیاهان، نظیر فعال سازی آنزیم، سنتز پروتئین، متابولیسم کربوهیدرات، اکسین‌ها و اسیدهای نوکلئیک، بیان ژن، تنظیم و تولید مثل (تشکیل گرده) نقش دارد. حرکت روی در خاک غالباً از طریق انتشار است که ضریب انتشار آن در خاک‌های قلیایی و آهکی نسبت به خاک‌های اسیدی بسیار کم‌تر است که دلیلی بر کمبود روی در خاک‌های قلیایی محسوب می‌شود (Nemcek *et al.*, 2020). اگر عناصر کم‌مصرف نظیر روی به صورت محلول‌پاشی در اختیار گیاه قرار گیرند، کمبود ناشی از مصرف خاکی را به‌طور کامل جبران می‌کنند و جایگزین مناسب در این زمینه به شمار می‌روند. رفع کمبود عنصر روی در شروع گل‌دهی، شدت اثرات کمبود عنصر روی را بر باروری دانه گرده و تولید دانه کاهش می‌دهد و باعث افزایش تعداد دانه در بوته، وزن هزار دانه و قدرت حیات بذر می‌شود (Momondi and Azizi, 2018).

توانایی جذب مواد مغذی در ژنوتیپ‌ها متفاوت است. در تنوع ژنتیکی بالای گونه‌ها، شناسایی مناسب‌ترین رقم در هر محیط آزمایشی امکان‌پذیر است. در مقایسه با سایر محیط‌های آزمایشی، اغلب یک یا چند رقم عملکرد بهتری نسبت به ارقام دیگر دارند که نشان‌دهنده سازگاری بالای آن رقم در آن شرایط خاص اکولوژیکی است (Bazile *et al.*, 2016). نظر به اهمیت شناخت ساختار ریشه‌ای و اندام هوایی گیاهان جدید زراعی به‌منظور بررسی توانایی

جذب عناصر تغذیه‌ای، این تحقیق با هدف ارزیابی اثر کود سوپرفسفات تریپل و محلول‌پاشی سولفات روی بر رشد، توسعه ساختار ریشه‌ای و تولید ماده خشک ارقام کینوا در شرایط کنترل شده اجرا گردید.

مواد و روش‌ها

این مطالعه در طول پاییز و زمستان سال زراعی ۱۳۹۸-۱۳۹۷ در ایستگاه اهواز مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان خوزستان به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلدان انجام شد. تیمارها شامل: مقادیر کود سوپرفسفات تریپل در چهار سطح (صفر، ۶، ۱۲ و ۱۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خاک)، محلول‌پاشی سولفات روی در سه غلظت (آب بدون سولفات روی (شاهد)، ۴ و ۸ گرم بر لیتر سولفات روی) و سه رقم کینوا (Giza 1، Q26، Titicaca) بودند. در این آزمایش، ۱۰۸ گلدان استوانه‌ای شکل از جنس P.V.C با قطر دهانه ۲۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر که در فواصل مشخص از یکدیگر در روی زمین و درون خاک قرار گرفته‌اند، تهیه شد. برای زهکشی مناسب گلدان‌ها، کف هر گلدان دو سانتی‌متر ماسه درشت ریخته، سپس خاک به این لایه افزوده شد. خاک گلدان از مزرعه ایستگاه تحقیقاتی مذکور تهیه شد. کود مورد نیاز از جمله نیتروژن و پتاسیم بر اساس نتایج آزمون خاک (جدول ۱) استفاده شد. از کود نیتروژن (اوره) به عنوان پایه و در دو مرحله ظهور خوشه و گلدهی و کود پتاسیم از منبع سولفات پتاسیم قبل از کاشت استفاده شد. کود فسفر از منبع سوپرفسفات تریپل (۴۶ درصد) تأمین و طبق تیمار هر گلدان آزمایشی استفاده شد. این کود قبل از کاشت با خاک گلدان مخلوط گردید.

در هر گلدان ۲۰ بذر کاشته شد. بذرها در عمق ۲-۱ سانتی‌متری کاشته شدند. پس از استقرار گیاهچه‌ها، به تعداد ۵ بوته در هر گلدان کاهش یافت. جهت محلول‌پاشی سولفات روی، غلظت مورد نظر تهیه شد و طبق تیمار درج شده بر هر گلدان، محلول‌پاشی در ساعات اولیه روز انجام شد. پس از پایان مراحل رشد، قسمت‌های هوایی هر گلدان بریده و سپس اندازه‌گیری‌های لازم به‌عمل آمد. صفات مورد بررسی در این آزمایش شامل: وزن خشک ریشه، پراکنش (عرض) ریشه، قطر ریشه، چگالی ریشه، فاصله اولین انشعاب تا نوک ریشه، نسبت وزن ریشه به وزن اندام هوایی، طول خوشه، تعداد دانه در بوته، وزن خشک دانه و نسبت فسفر به روی دانه بود. جهت اندازه‌گیری وزن خشک ریشه نمونه‌های استخراج شده، به مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۷۵ درجه سلسیوس قرار داده شد، سپس وزن خشک آن با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ گرم اندازه‌گیری گردید (Bidabadi *et al.*, 2016). پراکنش ریشه با خط‌کش و اندازه‌گیری فاصله بین بلندترین ریشه فرعی بر حسب سانتی متر حاصل گردید (Farhadian Asgarabadi and Isvand, 2017). قطر ریشه در فاصله ۳ سانتی متری از طوقه با استفاده از کولیس دیجیتالی اندازه‌گیری شد (Staji *et al.*, 2017). چگالی ریشه با استفاده از رابطه زیر به‌دست آمد (Ganjali *et al.*, 2010):

معادله (۱): حجم ریشه /وزن خشک ریشه =چگالی ریشه

در این رابطه چگالی ریشه برحسب گرم بر سانتی‌متر مکعب، وزن خشک ریشه بر حسب گرم و حجم ریشه یر حسب سانتی متر مکعب در نظر گرفته شد.

حجم ریشه‌ها پس از نمونه‌گیری و شستشوی گل ولای ریشه‌ها، توسط استوانه مدرج حاوی آب و پس از تغییر حجم آب بعد از قرار گرفتن ریشهٔ گیاه درون استوانهٔ مدرج، تعیین شد (Farhadian Asgarabadi and Isvand, 2017).

فاصله اولین انشعاب تا نوک ریشه پس از جداسازی آن از خاک با خط‌کش میلی‌متری اندازه‌گیری شد (Hossein Alipour *et al.*, 2020). از تقسیم وزن خشک ریشه به وزن خشک اندام هوایی، نسبت وزن ریشه به اندام هوایی حاصل گردید (Armin and Keyvanlu, 2015). جهت تعیین طول خوشه سه بوته به‌صورت تصادفی انتخاب و اندازه‌گیری‌های لازم انجام شد. پس از بوجاری بذور و شمارش آنها با دستگاه بذرشمار، میانگین تعداد دانه در بوته به‌دست آمد. وزن خشک دانه پس از قرارگیری در آون با دمای ۷۵ درجه سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت توسط ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۱ گرم محاسبه گردید (Mousavi *et al.*, 2015). از تقسیم محتوای فسفر به محتوای روی دانه نسبت فسفر به روی دانه حاصل گردید. محتوای فسفر دانه به روش اولسن و همکاران (Olsen *et al.*, 1954) با دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری و محتوای روی دانه به روش خاکستر خشک با استفاده از دستگاه جذب اتمی به‌دست آمد (Ramezani *et al.*, 2017).

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری Minitab (نسخه ۱۶/۲) انجام شد. میانگین‌ها بر اساس آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال پنج درصد مقایسه و منحنی‌ها با استفاده از نرم‌افزار Excel 2019 ترسیم گردیدند.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر اصلی کود فسفر، محلول‌پاشی سولفات روی، ارقام کینوا و بر هم‌کنش آنها بر وزن خشک ریشه، عرض ریشه، چگالی ریشه، فاصله اولین انشعاب تا نوک ریشه، نسبت وزن ریشه به اندام هوایی، طول خوشه اصلی، تعداد دانه در بوته و وزن خشک دانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار گردید. پارامتر قطر ریشه در سطح احتمال یک درصد تحت تاثیر اثر اصلی فسفر، رقم و برهم‌کنش فسفر و روی، فسفر و رقم و فسفر، روی و رقم قرار گرفت و محلول‌پاشی سولفات روی بر این پارامتر اثر معنی‌داری ایجاد نکرد. نسبت فسفر به روی دانه در سطح احتمال یک درصد تحت تاثیر اثر کود فسفر و ارقام کینوا و برهم‌کنش فسفر و روی قرار گرفت (جدول ۲).

وزن خشک ریشه: مقایسه معادله‌های رگرسیونی تغییر وزن خشک ریشه ارقام کینوا در واکنش به مقادیر کود سوپرفسفات تریپل نشان داد رقم Q26 با ضریب ۰/۲۱ بیش‌ترین سرعت تغییر را نسبت به این کود داشت و رقم Giza 1 با اختلاف اندک، از سرعت تغییر نزدیکی (۰/۲۰) نسبت به رقم Q26 برخوردار بود. رقم Titicaca با ضریب ۰/۰۹ کم‌ترین واکنش به کود فسفره را نشان داد. در واقع رقم Titicaca از کم‌ترین سرعت تغییر وزن خشک ریشه با تغییر مقادیر کود فسفره برخوردار بود (شکل ۱- الف). تفاوت در زیست توده ریشه ارقام مختلف را می‌توان به تفاوت ژنتیکی بین آن‌ها نسبت داد. تغییر در مورفولوژی و بیوماس ریشه به‌عنوان یکی از استراتژی‌های گیاهان فسفرکارا برای دسترسی بیش‌تر به فسفر خاک در شرایط کمبود فسفر معرفی شده است (Jami Moeini *et al.*, 2010).

به عبارتی ارقام کاراتر از نظر مصرف فسفر، به ازای هر واحد فسفر جذب شده ماده خشک بیشتری را تولید می‌کنند و این نوعی سازگاری در برابر شرایط کمبود فسفر محسوب می‌شود (Khalili Rad and Mirseyed hoseini, 2016). همچنین، بر اساس روند رگرسیونی تغییرات وزن خشک ریشه ارقام با تغییر مقادیر سولفات روی (شکل ۲- الف)، رقم Titicaca از یک روند صعودی تبعیت کرد و از سطح صفر (محلول‌پاشی با آب بدون سولفات روی) تا سطح ۸ در هزار سولفات روی روند افزایشی این پارامتر حاصل گردید. روند افزایشی وزن خشک ریشه در رقم Q26 تا سطح ۴ در هزار سولفات روی به‌دست آمد و پس از آن افزایش مصرف این کود سبب کاهش این پارامتر شد. در بین دو رقم Q26 و Giza 1، رقم Giza 1 سرعت کاهش بیش‌تری با افزایش غلظت سولفات روی داشت. یافته‌های خاوری‌نژاد و همکاران (Khavarinejad *et al*., 2011) نشان داد غلظت بالای روی با ایجاد اختلال در فرآیندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی، می‌تواند رشد گیاه را کاهش دهد.

نتایج برهم‌کنش عامل‌های آزمایشی نشان داد بیشترین افزایش وزن خشک ریشه (۳/۲۳ گرم در بوته) به رقم Q26 در شرایط کاربرد ۱۸ میلی-گرم بر کیلوگرم وزن خاک و غلظت ۴ در هزار سولفات روی تعلق داشت که با تیمار عدم مصرف کود و کاربرد آب بدون سولفات روی ۵۹/۷۶ درصد تفاوت داشت. در رقم Giza 1 بیشترین وزن خشک ریشه (۱/۸ گرم در بوته) در شرایط کاربرد ۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خاک فسفر به همراه محلول‌پاشی با غلظت ۴ در هزار سولفات روی حاصل گردید که با رقم Titicaca در این سطوح کاربرد عناصر تفاوت معنی‌دار نشان نداد (شکل ۳- الف). در شرایط مصرف حداکثری کود سوپر فسفات تریپل، رقم Giza 1 پاسخ مناسبی به کود سولفات روی نداشت، در حالی که رقم Q26 با کاربرد مقادیر متوسط سولفات روی حداکثر وزن ریشه را تولید نمود و در رقم Titicaca پاسخ بسیار مناسبی به کاربرد حداکثری کود سولفات به‌دست آمد. در این پژوهش کاربرد عنصر روی به‌صورت محلول‌پاشی و فسفر به‌صورت خاک کاربرد، باعث کاهش اثرات آنتاگونیستی شد و اثر توأم دو عنصر در مقایسه با کاربرد هریک به‌صورت جداگانه اثر مطلوب‌تری در توزیع ریشه و تولید ماده خشک داشت. این نتایج با نتایج گزارش شده توسط یاوز و کاراداغ (Yavuz and Karadag, 2015) مطابقت داشت.

عرض ریشه: بر اساس روند رگرسیونی تغییر عرض ریشه با مصرف کود سوپر فسفات تریپل (شکل ۱- ب)، میزان پراکنش و توسعه عرضی هر سه رقم کینوا از یک روند صعودی تبعیت نمود. در بین ارقام مورد مطالعه رقم Q26 با کسب بیشترین ضریب رگرسیونی (۲/۴۳) بیشترین واکنش و سرعت تغییر را در واکنش به کود فسفره از خود نشان داد. در بین دو رقم Giza 1 و Titicaca، اگرچه رقم Giza 1 از توسعه عرضی بیشتری برخوردار بود، اما سرعت تغییر کمتری (۰/۷۳) با مصرف کود فسفره نسبت به رقم Titicaca (۱/۲۲) داشت. افزایش جذب عناصر، ارتباط مستقیم با مورفولوژی و معماری ریشه گیاهان دارد که بر اساس افزایش زیست توده ریشه، طول ریشه، گستردگی و پراکنش عرضی ریشه، افزایش نسبت ریشه به شاخصاره و افزایش طول ریشه‌های جانبی استوار است که منجر به تسهیل جذب فسفر از منابع آلی و معدنی خاک می شود (Parentoni and de Souza Júnior, 2008). فسفر سبب ازدیاد

رشد گیاه، توسعه و گسترش ریشه می‌شود. بدین ترتیب گیاه می‌تواند از حجم بیشتری از خاک به منظور جذب عناصر غذایی استفاده کند که در چنین شرایطی جذب و کارایی استفاده از اکثر عناصر غذایی افزایش می‌یابد. به‌عبارت دیگر اهمیت فسفر می‌تواند از طریق افزایش رشد ریشه و جذب عناصر غذایی باشد (Vaziri Kateshouri *et al.*, 2013).

بررسی معادلات رگرسیونی و روند تغییر ساختار عرضی ریشه با کاربرد سولفات روی نشان داد واکنش دو رقم Q26 و Titicaca به مصرف این کود مثبت بوده و حداکثر توسعه عرضی ریشه این ارقام به‌ترتیب در شرایط کاربرد غلظت ۴ و ۸ در هزار سولفات روی حاصل گردید. در حالی که در رقم Giza 1 تغییر عرض ریشه از یک روند نزولی تبعیت نمود (شکل ۲- ب). گیاهان دارای سیستم ریشه‌ای قوی‌تر و گسترده‌تر، در جذب عناصر و انتقال آن کاراتر هستند و توجه به ویژگی‌های ژنتیکی ارقام در این زمینه می‌تواند توصیه کودی مؤثرتری را به دنبال داشته باشد (Khalilirad and Mirseyed hoseini, 2016).

نتایج مقایسه میانگین نشان داد رقم Q26 در شرایط کاربرد ۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خاک کود فسفر و محلول‌پاشی با غلظت ۸ در هزار سولفات روی بیشترین مقادیر پراکنش ریشه (۱۸/۳ سانتی متر) را ثبت نمود. اگرچه این تیمار با تیمار کاربرد ۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خاک کود فسفر و غلظت ۴ در هزار سولفات روی و نیز تیمار کاربرد ۱۸ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خاک فسفر و محلول‌پاشی با غلظت ۴ در هزار سولفات روی در این رقم در یک سطح آماری قرار گرفت (شکل ۳، ب). به‌نظر می‌رسد که کاربرد کودهای سوپر فسفات تریپل و سولفات روی، ضمن فراهم نمودن عناصر غذایی مورد نیاز گیاه، سبب بهبود ویژگی‌های مورفولوژیکی و پراکنش و توسعه عرضی گیاه کینوا شد. این نتایج با یافته‌های سپهری و همکاران (Sepehri *et al.*, 2017) و پانگ و همکاران (Pang *et al.*, 2017) هم راستا بود. همچنین، در یک بررسی مصباح و همکاران (Mesbah *et al.*, 2021) اذعان نمودند افزایش جذب عناصر غذایی و به دنبال آن فتوسنتز بیشتر برگ، با اختصاص کربن بیشتر به ریشه در افزایش رشد ریشه موثر است.

قطر ریشه: بررسی روند رگرسیونی تغییر قطر ریشه با کاربرد کود سوپر فسفات تریپل نشان داد هر سه رقم مورد مطالعه از روند صعودی تغییر میزان قطر ریشه با کاربرد سطوح کود فسفره تبعیت نمودند. در بین این ارقام، رقم Giza 1 با ضریب ۰/۶۹ از سرعت تغییر بیشتری برخوردار بود. رقم Titicaca با ضریب رگرسیونی ۰/۳۶ پس از رقم Giza 1 در جایگاه دوم قرار گرفت و رقم Q26 از کمترین تغییرات قطر ریشه نسبت به مصرف کود فسفره برخوردار بود. رقم Q26 با وجود میزان قطر بیشتر در سطوح صفر، ۶ و ۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خاک فسفر، اما از سرعت تغییرات کمتری نسبت به سایر ارقام برخوردار بود (شکل ۱- پ). بر اساس نتایج برهم‌کنش عامل‌های آزمایشی رقم Giza 1 در شرایط کاربرد ۱۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خاک فسفر بیشترین قطر ریشه (۸/۷ میلی‌متر) را دارا بود. با این حال این تیمار با تیمار کاربرد ۱۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خاک فسفر و محلول‌پاشی با غلظت ۴ در هزار سولفات روی در رقم Q26 تفاوت معنی‌داری نشان نداد (شکل ۳، پ). این نتیجه با نتایج گزارش شده توسط باقری (Bagheri, 2018)، مطابقت داشت. فسفر از اجزای سازنده

سلول و گیاه است و به‌منظور طویل‌شدن سلول‌ها و تقسیم سلولی الزامی و ضروری است. به‌عبارتی، این عنصر در استقرار اولیه ریشه گیاه و بر فعالیت‌های مریستمی و تقسیم سلولی اثر بسیار مهمی دارد، لذا گیاه تحت تیمار با مقادیر فسفر بیش‌تر استقرار اولیه زودتری داشته و با قدرت استحکام بیش‌تر و افزایش طول دوره رشد رویشی و زایشی، تولیدات گیاهی را افزایش می‌دهد (Enfejari and Bayat 2017). پانگ و همکاران (Pang *et al.*, 2017) اظهار داشتند که فسفر مناسب (P_2O_5) باعث بهبود فعالیت ریشه، رشد ریشه، افزایش سطح تماس ریشه و خاک، بهبود استحکام ریشه، تقویت توانایی آنتی اکسیدانی ریشه و در نتیجه افزایش مقاومت کینوا در خاک‌های قلیایی می‌شود.

چگالی ریشه: در بررسی ارتباط رگرسیونی چگالی ریشه با تغییر مقادیر کود فسفره، دو رقم Giza 1 و Q26 دارای سرعت یکسانی (۰/۰۶) در تولید ماده خشک ریشه در یک متر مکعب خاک (چگالی ریشه) بودند و کمترین ضریب رگرسیونی این پارامتر (۰/۰۲) متعلق به رقم Titicaca بود. با این حال در سطح ۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خاک فسفر که بیش‌ترین چگالی ریشه در هر سه رقم حاصل گردید، رقم Q26 از چگالی بالاتری نسبت به سایر ارقام برخوردار بود (شکل ۱- ت). در ارزیابی خطوط رگرسیون چگالی ریشه در واکنش به مقادیر سولفات روی، چگالی ریشه دو رقم Giza 1 و Titicaca با افزایش سولفات روی افزایش یافت، اما چگالی ریشه رقم Q26 از روند نزولی پیروی نمود. به این معنا که افزایش سطوح سولفات روی از صفر تا غلظت ۸ در هزار، سبب کاهش وزن خشک ریشه این رقم در یک مترمکعب خاک گردید. در بین دو رقم Giza 1 و Titicaca، رقم Titicaca از سرعت تشکیل ماده خشک ریشه بالاتری در حجم معین خاک برخوردار بود (شکل ۲- پ).

بر اساس شکل ۳- ث، بیشترین چگالی ریشه با میانگین ۰/۹۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب در شرایط کاربرد ۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خاک فسفر و در رقم Q26 حاصل گردید که با دیگر سطوح کودی و نیز با دیگر ارقام کینوا اختلاف معنی‌دار نشان داد. کاربرد عناصر مغذی در محصولات زراعی یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در رشد ریشه و عملکرد گیاهان یک‌ساله است (Fageria, 2014). رشد بهتر ریشه منجر به محصولات قوی‌تر، فتوسنتز کارآمدتر و در نهایت، عملکرد بالاتر محصول می‌شود (Shokouhfar *et al.*, 2020). در این پژوهش، سطح کودی ۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خاک فسفر نشان‌دهنده تاثیرپذیری مطلوب ریشه کینوا در مجاورت کود فسفر بوده و در حجم مشخص خاک ریشه بیشتری به لحاظ وزنی تولید شده است. بنابراین، ریشه با حجم بیشتر خاک مرتبط بوده و جذب آب و عناصر غذایی بیشتر شده و ریشه توسعه یافته‌تر بوده و از قوام بالاتری برخوردار است.

فاصله اولین انشعاب تا نوک ریشه: ارزیابی روند رگرسیونی صفات نشان داد در رقم Giza 1 با ضریب رگرسیونی ۱/۹۷ بیشترین تغییر فاصله اولین انشعاب تا نوک ریشه در واکنش به کود فسفره حاصل گردید و رقم Titicaca و Q26 به ترتیب در جایگاه دوم و سوم قرار گرفتند. با این حال، رقم Q26 با وجود کسب کمترین سرعت تغییرات (۰/۱۶) در واکنش به کاربرد کود سوپرفسفات تریپل از بیشترین مقادیر این صفت برخوردار بود (شکل ۱- ث). بررسی ارتباط رگرسیونی فاصله اولین انشعاب تا نوک ریشه با

کاربرد سولفات روی نشان داد هر سه رقم کینوا واکنش منفی به کاربرد این کود نشان دادند و خطوط رگرسیونی از یک روند نزولی تبعیت نمود. با این حال، رقم Q26 از کمترین سرعت کاهشی (۰/۳۱-) و رقم Titicaca از بیشترین سرعت کاهشی (۰/۶۴-) این پارامتر با افزایش سولفات روی برخوردار بود و رقم Giza 1 با اختلاف اندکی از رقم Q26 (با ضریب رگرسیونی ۰/۳۶-) در جایگاه دوم قرار گرفت (شکل ۲- ت). نتایج مقایسه میانگین نشان داد در دو رقم Giza 1 و Titicaca در شرایط کاربرد ۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خاک و غلظت ۴ در هزار سولفات روی حداکثر فاصله اولین انشعاب تا نوک ریشه به‌دست آمد. افزایش کود فسفره تا سطح ۱۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خاک فسفر و افزایش غلظت سولفات روی سبب کاهش فاصله اولین انشعاب تا نوک ریشه در ارقام مذکور شد. بیشترین افزایش فاصله اولین انشعاب تا نوک ریشه به رقم Q26 در سطوح کاربرد ۱۲ و ۱۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خاک و غلظت ۴ در هزار سولفات روی تعلق داشت که با تیمار عدم مصرف کود و کاربرد آب بدون سولفات روی تفاوت معنی‌دار داشت (شکل ۱، ت). در صورت کمبود یا زیادبود عناصر، فاصله بین نوک ریشه و ناحیه تمایز بافت تغییر نموده که در تحقیق حاضر کاربرد عناصر در سطوح شاهد و بهینه به وضوح نشان‌دهنده میزان تغییر در فاصله اولین انشعاب تا نوک ریشه است. این امر سبب تشکیل ریشه‌های جانبی و انشعابات فرعی در فواصل گوناگون از محور ریشه گردیده که در جذب عناصر خاک مؤثر است. نتایج به‌دست آمده همسو با نتایج فخری و همکاران (Fakhri *et al*., 2017) بود.

نسبت وزن ریشه به اندام هوایی: نتایج روند رگرسیونی پارامتر نسبت وزن ریشه به اندام هوایی در واکنش به مصرف کود P_2O_5 نشان داد رقم Q26 با ضریب رگرسیونی ۰/۱۴- از بیشترین سرعت نزولی و رقم Titicaca با ضریب ۰/۰۰۹- از کمترین سرعت نزولی تغییر نسبت وزن ریشه به اندام هوایی با افزایش مصرف کود سوپر فسفات تریپل برخوردار بود. این نتایج حاکی از آن است که افزایش مصرف کود فسفر سبب کاهش بیشتر وزن ریشه به اندام هوایی در رقم Q26 شد. رقم Giza 1 با ضریب ۰/۰۴- از روند کاهشی بیشتری در مقایسه با رقم Titicaca برخوردار بود (شکل ۱- ج). همچنین، روند تغییرات نسبت وزن ریشه به اندام هوایی با افزایش سطوح سولفات روی نشان داد تغییرات این پارامتر در دو رقم Giza 1 و Q26 از یک روند کاهشی پیروی نمود، در حالی که در رقم Titicaca از یک روند افزایشی تبعیت نمود. در بین دو رقم Giza 1 و Q26 واکنش رقم Q26 به افزایش غلظت سولفات روی بیشتر بوده و با ضریب رگرسیونی ۰/۰۶- از سرعت نزول بیشتری نسبت به رقم Giza 1 برخوردار بود. با این حال روند نزولی و سرعت کاهش نسبت وزن ریشه به اندام هوایی رقم Giza 1 با اختلاف اندکی از رقم Q26 به‌دست آمد (شکل ۲- ث).

بررسی‌ها نشان داد بیشترین نسبت وزن ریشه به اندام هوایی به رقم Q26 در شرایط عدم مصرف کود فسفره (۱/۰۸) و مصرف ۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خاک فسفر (۱/۰۹) و برگ‌پاشی آب بدون سولفات روی حاصل گردید و افزایش سطوح فسفر و روی سبب کاهش این نسبت شد. در رقم Giza 1 کمترین نسبت وزنی ریشه به اندام هوایی در شرایط کاربرد ۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خاک فسفر و محلول‌پاشی با غلظت ۸ در

هزار سولفات روی به‌دست آمد که با تیمار $P_{12}+Zn_8$ و $P_{18}+Zn_8$ در رقم Q26 تفاوت معنی‌دار نداشت. در شرایط کاربرد ۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خاک فسفر، رقم Titicaca از نسبت وزن ریشه به وزن اندام هوایی بالاتری در مقایسه با رقم Giza 1 برخوردار بود (شکل ۱، ج). در شرایط عدم مصرف عناصر (شاهد)، رشد ریشه و اندام هوایی تحت تاثیر عناصر موجود در خاک است. با افزایش میزان دسترسی به عناصر، رشد ریشه و شاخساره گیاه کینوا تحت تاثیر قرار گرفته، به گونه‌ای که در بالاترین سطوح مصرف عناصر به‌دلیل افزایش بیشتر زیست توده شاخساره نسبت به ریشه، کمترین نسبت وزنی ریشه به اندام هوایی به‌دست آمد. شکل‌گیری ریشه‌های خوشه‌ای تحت شرایط کمبود فسفر از سازگاری‌های گیاهی است که باعث افزایش دریافت و استفاده از فسفر می‌شود (Khalili, 2017). گیاهان در شرایط کمبود فسفر نسبت ریشه به شاخساره بیشتری تولید می‌کنند و این نسبت در گونه‌های کاراتر بیشتر است (Khalili Rad and Mirseyed Hoseini, 2016).

طول خوشه: بر اساس نتایج روند رگرسیونی صفات، طول خوشه رقم Giza 1 با سرعت بیشتری تحت تاثیر کود فسفره قرار گرفت (ضریب رگرسیون: ۱/۱۳) و پس از آن رقم Q26 با ضریب ۰/۷۷ از بیشترین شیب خط رگرسیونی برخوردار بود. با این حال، کمترین سرعت تغییرات طول خوشه با مصرف کود فسفره به رقم Titicaca تعلق داشت. روند رگرسیونی هر سه رقم کینوا با افزایش مصرف کود سوپرفسفات تریپل یک روند افزایشی بود (شکل ۱- چ). بررسی توابع رگرسیونی ارقام کینوا در واکنش به‌مصرف کود سولفات روی نشان داد تغییرات طول خوشه دو رقم Giza 1 و Titicaca از یک روند نزولی پیروی نمود و بیشترین شیب کاهشی به رقم Giza 1 با ضریب رگرسیونی ۰/۷۹- تعلق داشت. رقم Titicaca با ضریب رگرسیونی ۰/۱۱- از واکنش کمتری نسبت به رقم Giza 1 برخوردار بود. رقم Q26 با کسب ضریب رگرسیونی ۰/۴۹ از یک روند صعودی پیروی نمود، به این معنا که افزایش کاربرد سولفات روی سبب افزایش طول خوشه در این رقم گردید (شکل ۲- ج).

نتایج مقایسه میانگین (جدول ۵) نشان داد بیشترین طول خوشه در رقم Q26 با کاربرد ۱۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خاک فسفر و غلظت ۴ در هزار سولفات روی به‌دست آمد که با تیمار شاهد در این رقم ۵۸/۵۵ درصد اختلاف داشت. بیشترین طول خوشه رقم Giza 1 با میانگین ۱۱/۰۶ سانتی‌متر در تیمار ۱۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خاک فسفر و آب بدون سولفات روی حاصل گردید. اگرچه این تیمار با تیمار $P_{12}+Zn_4$ (۱۰/۴ سانتی‌متر) اختلاف معنی‌داری نداشت. رقم Titicaca در سطح ۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خاک فسفر و غلظت ۴ در هزار سولفات روی بیشترین مقادیر طول خوشه را به‌دست آورد که نسبت به تیمار عدم مصرف کود (P_0+Zn_0) ۳۶/۳۱ درصد افزایش داشت. در شرایط عدم مصرف عناصر (شاهد) رقم Giza 1 از کمترین طول خوشه نسبت به سایر ارقام برخوردار بود.

افزایش شاخص‌های کمی گیاه کینوا نظیر طول خوشه تحت تاثیر عناصر فسفر و روی هم راستا با نتایج خلیلی (Khalili, 2017) بود. این محقق بیان کرد افزایش مقادیر کود فسفر به میزان ۵۰ و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار در مقایسه با تیمار شاهد به‌ترتیب منجر به افزایش ۵/۲۱ و ۸/۷۹ درصدی در طول خوشه شد. همچنین،

محلول‌پاشی عنصر روی باعث افزایش طول خوشه (۴/۸۵ درصد) در مقایسه با تیمار شاهد گردید.

روی یکی از عوامل اثرگذار در فعالیت آنزیم تریپتوفان‌سنتاز می‌باشد و با توجه به آنکه اسید آمینه تریپتوفان به‌عنوان پیش ماده تولید اکسین عمل می‌کند، لذا با افزایش تولید اکسین، تشدید چیرگی رأسی و متعاقب آن افزایش رشد خوشه دور از انتظار نخواهد بود (Khalili, 2017). به‌نظر می‌رسد افزایش طول خوشه با اثرگذاری بر محورهای تولید دانه عملکرد گیاه کینوا را تحت تاثیر قرار داده است.

تعداد دانه در بوته: بررسی توابع رگرسیونی نشان داد رقم Q26 با کسب بیشترین ضریب رگرسیونی (۷۸۵/۲) بیشترین سرعت تغییرات تعداد دانه در بوته را با کاربرد کود فسفره به خود اختصاص داد و رقم Titicaca از کمترین واکنش نسبت به کود فسفره برخوردار بود. روند تغییرات تعداد دانه در بوته سه رقم مورد مطالعه با کاربرد کود P_2O_5 یک روند صعودی بود (شکل ۱- ح). مقایسه توابع رگرسیونی ارقام حاکی از نقش مؤثر کود سولفات روی در افزایش تعداد دانه در بوته رقم Titicaca و کاهش این پارامتر در دو رقم Giza 1 و Q26 گردید. به گونه‌ای که بیشترین سرعت کاهشی با ضریب ۴۱۳/۵- به رقم Giza 1 تعلق داشت. این نتایج حاکی از اثرپذیری بیشتر تعداد دانه رقم Giza 1 در مقایسه با رقم Q26 با افزایش غلظت سولفات روی بود (شکل ۲- چ). به نظر می رسد واکنش‌های متفاوت ارقام کینوا متاثر از ویژگی‌های ژنتیکی ارقام باشد.

بر اساس نتایج برهم‌کنش عامل‌های آزمایشی رقم Giza 1 با میانگین ۴۸۹۱ دانه در بوته در شرایط کاربرد ۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خاک فسفر و آب بدون سولفات روی حداکثر این پارامتر را به‌دست آورد. کاربرد ۱۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خاک فسفر و غلظت ۴ در هزار سولفات روی سبب حصول بیشترین تعداد دانه در بوته رقم Q26 گردید که نسبت به تیمار عدم مصرف کود ۸۸/۵۸ درصد افزایش داشت. رقم Titicaca از پتانسیل تولید دانه کمتری با افزایش سطوح مصرف فسفر و روی برخوردار بود. با این حال بیشترین تعداد دانه در بوته این رقم در شرایط کاربرد ۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خاک فسفر و غلظت ۴ در هزار سولفات روی حاصل گردید (جدول ۵). افزایش تعداد دانه در بوته کینوا تحت تاثیر کاربرد عناصر تغذیه‌ای با نتایج منصوری و همکاران (Mansouri *et al.*, 2021) مطابقت داشت. به‌نظر می‌رسد کمبود عناصر غذایی در سطوح شاهد سبب کاهش فتوسنتز جاری و افت میزان دسترسی دانه‌ها به مواد غذایی و در نتیجه سقط بخشی از دانه‌ها شده است. بر اساس قانون بازده نزولی میچرلیخ، در سطوح پایین کودی در اثر کمبود عنصر غذایی در خاک، رشد و عملکرد گیاه تحت تأثیر این کمبود است که با مصرف آن عنصر غذایی، رشد و تولید افزایش می‌یابد. این نتایج با یافته‌های وزیری کاتشوری و همکاران (Vaziri Kateshouri *et al.*, 2013) هم راستا بود.

وزن خشک دانه: مقایسه روند تغییرات وزن خشک دانه ارقام کینوا در پاسخ به کاربرد کود سوپر فسفات تریپل نشان داد رقم Q26 با سرعت ۲/۴۲ بیشترین افزایش و رقم Titicaca از کمترین شیب افزایشی در واکنش به مصرف کود فسفره برخوردار بود (ضریب رگرسیونی: ۰/۲۱). رقم Giza 1 نیز با ضریب ۱/۱۲ از سرعت تغییر کمتری نسبت به رقم Q26 و واکنش بیشتری نسبت به رقم Titicaca برخوردار بود (شکل ۱-

خ). همچنین، روند تغییرات وزن خشک دانه ارقام کینوا با تغییر سطوح سولفات روی نشان داد دو رقم Titicaca و Q26 با کسب ضریب رگرسیونی ۰/۱۲ و ۰/۰۸ به‌ترتیب از بیشترین سرعت تغییرات افزایشی در شرایط کاربرد کود سولفات روی برخوردار بودند. رقم Giza 1 پاسخ کاهشی نسبت به کاربرد کود سولفات روی داشت و افزایش غلظت این کود منجر به کاهش وزن خشک دانه این رقم گردید (شکل ۲- ج). هر ژنوتیپ از ثبات بیشتری در یک محیط خاص برخوردار است (Mostafavi Rad *et al*., 2018). سپهوند (Sepehvand, 2013) نشان داد که ژنوتیپ‌های Q26، Giza 1، Q29، Red carina و Titicaca کینوا با میانگین ۲۵۰۶، ۲۳۰۴، ۲۰۳۱، ۱۸۱۷ و ۱۱۲۲ کیلوگرم در هکتار بیشترین عملکرد را داشتند.

بر اساس نتایج این تحقیق، بیشترین وزن خشک دانه در شرایط کاربرد ۱۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خاک فسفر و غلظت ۴ در هزار سولفات و در رقم Q26 حاصل گردید. در دو رقم Giza 1 و Titicaca بیشترین وزن خشک دانه به‌ترتیب با میانگین ۹/۲۰ و ۸/۵۷ گرم در بوته در شرایط کاربرد ۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خاک فسفر و غلظت ۴ در هزار سولفات روی گردید (جدول ۵). بهبود شرایط تغذیه‌ای و نقش مثبت فسفر و روی در فتوسیستم‌های نوری می‌تواند در افزایش شاخص‌های رشدی، فیزیولوژیکی و عملکردی گیاه کینوا مؤثر باشد. این امر به نوبه خود باعث افزایش تولید کربوهیدرات و انتقال آن به دانه‌ها و افزایش عملکرد می‌شود (Rajaie and Ziaeyan, 2009). در اثر مصرف روی مقدار کل کربوهیدرات، نشاسته و پروتئین ساخته شده توسط گیاه افزایش می‌یابد و با افزایش کربوهیدرات سرعت و طول دوره پر شدن دانه افزایش و در نتیجه وزن هزار دانه افزایش یافته که این عوامل در نهایت موجب افزایش عملکرد دانه می گردند (Seyed Sharifi *a*nd Kamri, 2014).

نسبت فسفر به روی دانه: بررسی نسبت محتوای فسفر به روی دانه ارقام نشان داد رقم Giza 1 از بیشترین نسبت فسفر به روی دانه برخوردار بود که نسبت به رقم Q26 و Titicaca به‌ترتیب ۱۲/۵۱ و ۶/۰۲ درصد اختلاف داشت (جدول ۳). در شرایط کمبود عناصر و وضعیت نامناسب خاک، ژنوتیپ‌های کارآمد از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. کارآیی یک ژنوتیپ خاص برای یک ماده مغذی خاص بستگی به جذب بیشتر از خاک، انتقال بهتر به قسمت‌های در حال رشد و استفاده کارآمد از مواد مغذی جذب شده در اندام‌های گیاهی دارد. تفاوت‌های ژنوتیپی در جذب و بهره‌وری عناصر در ارقام مختلف گیاهان زراعی گزارش شده است. ژنوتیپ‌های مقاوم‌تر به کمبود فسفر و روی نرخ جذب بالاتری داشته و نسبت به ژنوتیپ‌های حساس واکنش کمتری به کمبود عناصر دارند. این ژنوتیپ‌ها به‌منظور حفظ تعادل عناصر تغذیه‌ای انتقال عناصر به ساقه را افزایش داده و حمل و نقل و ذخیره عناصر را تنظیم می‌کنند (Khan *et al*., 2015). بر اساس نتایج، کاربرد ۱۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خاک سوپرفسفات تریپل و کاربرد آب بدون سولفات روی سبب افزایش این نسبت (۹۷/۷۹) در دانه کینوا شد. این افزایش در مقایسه با تیمار شاهد (عدم مصرف کود) ۱۷/۲۹ درصد بود. در سطوح صفر و ۱۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خاک سوپرفسفات تریپل با کاربرد سولفات روی این نسبت کاهش یافت و در سطوح ۶ و ۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خاک سوپرفسفات تریپل با کاربرد

سولفات روی نسبت محتوای فسفر به روی دانه کینوا افزایش نشان داد. با این حال، در شرایط مصرف ۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خاک کود فسفره و کاربرد آب بدون سولفات روی کمترین نسبت فسفر به روی دانه حاصل گردید (جدول ۴). افزایش محتوای عناصر دانه در شرایط کاربرد عناصر مطابق با نتایج ارباس و همکاران (Erbas *et al.*, 2017) بود. این محققین بیان کردند که کاربرد فسفر اثر مثبتی بر رشد، عملکرد و خصوصیات کیفی گیاهان دارد. در این تحقیق، سطح فسفر قابل جذب کمتر از حد بحرانی برای محصول کینوا بود. بنابراین، استفاده از کود فسفر در مقایسه با حالت کنترل (P_0)، با کاهش موضعی اسیدیته خاک و بهبود حلالیت ترکیبات حاوی فسفر در خاک، باعث افزایش غلظت فسفر و تغییر نسبت فسفر به روی در دانه کینوا در شرایط مطلوب شد. عبداله‌پور و همکاران (Abdolahpour *et al.*, 2021) گزارش کردند افزایش مصرف کود شیمیایی فسفره سبب بهبود جذب عناصر و افزایش تجمع عناصر در دانه کینوا گردید و بیشترین محتوای عناصر در تیمار ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار فسفر حاصل گردید. تعامل مناسب P/Zn در متابولیسم فعال بافت‌های گیاهی و بر بسیاری از فرایندهای فیزیولوژیکی از جمله جذب، انتقال، توزیع و تجمع اثر می‌گذارد. به قاطعیت مشخص شده است که فعل و انفعالات عمده بین روی و فسفر در سطح متابولیک گیاه اتفاق می‌افتد و یک اختلال متابولیکی در داخل سلول‌های گیاهی به عدم تعادل بین فسفر و روی در اجزای ذخیره‌ای منجر می‌شود. بنابراین الگوی پاسخ گیاهان با ظرفیت آنها در تجمع عناصر و حفظ تعادل P/Zn در اجزای گیاهی نظیر دانه ارتباط مستقیم دارد (Mai *et al.*, 2011). سانچز رودریگو و همکاران (Sánchez Rodrígue *et al.*, 2021) گزارش کردند در خاک‌هایی که در جذب عناصر فسفر و روی محدودیت وجود دارد یا حاوی مقادیر کم عنصر روی می‌باشند، جهت توسعه کافی باید نسبت‌های مناسبی از دو عنصر فسفر و روی استفاده شود. این عناصر تغذیه‌ای نه تنها در خاک بلکه در اجزا و بافت‌های گیاهی تعامل داشته و با اثرگذاری بر فرایندهای فیزیولوژیکی، محتوای عناصر دانه و سایر اجزای گیاهی را تغییر می‌دهند. همچنین، این محققان گزارش کردند مقدار کل فسفر و روی دانه در هنگام رسیدگی فیزیولوژیکی گیاهان شاهد کاهش یافت و تنها در گیاهانی که در معرض همزمان دو عنصر فسفر و روی قرار گرفتند، بهترین کیفیت دانه حاصل گردید.

رگرسیون گام به گام صفات مورد مطالعه:

نتایج رگرسیون گام به گام (جدول ۶) که در آن وزن خشک دانه به‌عنوان متغیر وابسته و پارامترهای ریشه به‌عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شدند، نشان داد سه پارامتر وزن خشک ریشه، عرض ریشه و قطر ریشه ۷۲/۷۴ درصد تغییرات وزن خشک دانه را توجیه نمودند. به عبارتی، در گام اول وزن خشک ریشه وارد مدل گردید. این پارامتر ۶۶/۹۷ تغییرات وزن خشک دانه را توجیه کرد. در گام دوم علاوه بر وزن خشک ریشه، پارامتر عرض ریشه وارد مدل رگرسیونی شد و ۶۹/۹۴ درصد از تغییرات وزن خشک دانه را توجیه نمود. در واقع سهم پارامتر عرض ریشه از وزن خشک دانه، ۲/۹۷ درصد بوده است و در گام سوم علاوه بر دو پارامتر وزن خشک ریشه و عرض ریشه، پارامتر قطر ریشه وارد مدل رگرسیونی گردید که در مجموع ۷۲/۷۴ تغییرات وزن خشک ریشه توسط این سه پارامتر توجیه گردید. به گونه‌ای که سهم پارامتر قطر ریشه ۲/۸

درصد به‌دست آمد. بنابراین، عامل عمده در افزایش وزن خشک دانه، پارامتر وزن خشک ریشه با ضریب تبیین ۶۶/۹۷ بود. کاربرد بهینه عناصر تغذیه‌ای در مورفولوژی و معماری ریشــه نمود می‌کند. مهم‌ترین تغییر ساختاری، افزایش وزن، انشعابات ریشه و تارهای مویین ریشه است (Naseri *et al.*, 2018) که این نتایج با یافته‌های این آزمایش مبنی بر افزایش وزن و توسعه ساختار ریشه‌ای در واکنش به مصرف عناصر فسفر و روی مطابقت داشت. همان‌طورکه در نتایج تجزیه رگرسیون نشان داده شده است، وزن خشک ریشه اثر قابل توجهی (۶۶/۹۷ درصد) در ماده خشک تولیدی داشته که حاکی از نقش ویژه این پارامتر در افزایش تولیدات گیاهی است.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان داد مصرف کود سوپرفسفات تریپل به‌میزان ۱۲ و ۱۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خاک و برگ‌پاشی سولفات روی با غلظت ۴ در هزار سبب توسعه ساختار ریشه‌ای و بهبود پراکنش ریشه کینوا شد. افزایش چگالی ریشه با افزایش سطح تماس ریشه با خاک سبب افزایش میزان جذب عناصر و بهبود عملکرد اقتصادی شد. همچنین، افزایش نسبت ریشه به شاخساره به‌عنوان یک ساز و کار در شرایط کمبود عناصر خاک شناسایی شد که با تغییر وزن خشک ریشه، بهبود پراکنش ریشه در لایه‌های خاک و افزایش انشعابات جانبی و تارهای مویین همراه بود. به دنبال بهبود ساختار ریشه‌ای و افزایش جذب عناصر، رشد و نمو اندام هوایی تحت تاثیر قرار گرفت که منجر به افزایش مؤلفه‌های تولید نظیر تعداد و وزن دانه کینوا شد. در میان ارقام مورد بررسی، رقم Q26 از سیستم ریشه‌ای و شاخساره توسعه یافته‌تری برخــوردار بود و دو رقم Giza 1 و Titicaca در رده‌های دوم و سوم قرار گرفتند.

سپاسگزاری

بدینوسیله نگارندگان مراتب تشکر و قدردانی خویش را از کلیه فرهیختگان ارجمند مرکز تحقیقات، آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خوزستان و دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز به سبب همکاری در اجرا، تدوین و ارایه این پژوهش اعلام می‌دارند.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک آزمایش.

Table 1- Physical and chemical characteristics of the experimental soil

عمق خاک Soil depth (cm)	بافت خاک Soil texture	pH	شوری Salinity ($ds.m^{-1}$)	کربن آلی Organic carbon (٪)	نیتروژن Nitrogen (٪)	فسفر Phosphorus ($mg.kg^{-1}$)	پتاسیم Potassium ($mg.kg^{-1}$)	روی Zinc ($mg.kg^{-1}$)
0-30	لومی	7.9	4.5	0.58	0.055	10.5	245	0.42
30-60		8	4.4	0.53	0.048	11.2	265	0.38

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس پارامترهای مورفولوژیکی، کمی و کیفی مرتبط با ریشه و اندام هوایی گیاه کینوا

Table 2- Results of variance analysis of morphological, quantitative and qualitative parameters related to roots and shoots of quinoa

منابع تغییرات S.O. V.	درجه آزادی df	وزن خشک ریشه Root dry weight	عرض ریشه Root width	قطر ریشه Root diameter	چگالی ریشه Root density	فاصله اولین انشعاب تا نوک ریشه Distance from the first branch to the tip of the root
فسفر (Phosphorus)	3	1.75**	155.90**	8.59**	0.23**	311.89**
روی (Zinc)	2	1.08**	7.15**	0.55 ns	0.07**	356.72**
رقم (Cultivar)	2	3.12**	308.75**	14.10**	0.003*	333.74**
فسفر× روی (Phosphorus× Zinc)	6	0.66**	57.99**	3.36**	0.04**	225.91**
فسفر× رقم (Phosphorus× Cultivar)	6	0.86**	18.71**	5.92**	0.06**	174.20**
روی× رقم (Cultivar × Zinc)	4	0.51**	11.38**	2.28 ns	0.11**	23.01**
فسفر× روی × رقم (Phosphorus× Zinc×Cultivar)	12	0.82**	39.89**	4.01**	0.08**	215.93**
خطا (Error)	72	0.03	0.89	0.61	0.0006	3.28
ضریب تغییرات (%) C.V.	-	17.18	9.44	14.38	4.37	7.09

ns، *، **، به‌ترتیب غیرمعنی‌داری، معنی‌داری در سطح احتمال پنج و یک درصد.

ns, *, **, non-significant, significant at five and one percent probability levels, respectively.

ادامه جدول ۲-

Table 2- Continued

منابع تغییرات S.O. V.	درجه آزادی df	نسبت وزن ریشه به اندام هوایی Root weight to shoot weight	طول خوشه Panicle length	تعداد دانه در بوته Number of grains per plant	وزن خشک دانه Grain dry weight	نسبت فسفر به روی دانه P/Zn
فسفر (Phosphorus)	3	0.21**	27.73**	11635165**	82.04**	2201**
روی (Zinc)	2	0.05**	22.38**	2022429**.	18.90**	58.70ns
رقم (Cultivar)	2	0.04**	7.74**	10398875**	65.74**	1019.30**
فسفر× روی (Phosphorus× Zinc)	6	0.05**	6.17**	2737080**	12.75**	946.40**
فسفر× رقم (Phosphorus× Cultivar)	6	0.13**	11.30**	8217060**	49.45**	373.30ns
روی× رقم (Cultivar × Zinc)	4	0.08**	6.75**	2549124**	7.13**	107.50ns
فسفر× روی × رقم (Phosphorus× Zinc×Cultivar)	12	0.08**	8.43**	3458951**	19.98**	52.40ns
خطا (Error)	72	0.005	0.41	21792	0.09	112.9
ضریب تغییرات (%) C.V.	-	21.03	9.02	8.92	7.75	13.31

ns، *، **، به‌ترتیب غیرمعنی‌داری، معنی‌داری در سطح احتمال پنج و یک درصد.

ns, *, **, non-significant, significant at five and one percent probability levels, respectively.

جدول ۳- تفاوت محتوای فسفر به روی دانه ارقام کینوا

Table 3- Differences in grain P/Zn ratio of quinoa cultivars

رقم (Cultivar)	رقم گیزا وان Giza 1 cultivar	رقم کیو ۲۶ Q26 cultivar	رقم تی‌تی کاکا Titicaca cultivar
محتوای فسفر به روی دانه Grain P/Zn ratio	85.07	74.43	79.95
LSD 5%		4.95	

میانگین‌ها به‌صورت مستقل با آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد مقایسه شدند.

The means were independently compared with the LSD test at the 5% probability level.

جدول ۴- نتایج بر هم‌کنش کود سوپر فسفات تریپل و سولفات روی بر محتوای فسفر به روی دانه کینوا

Table 4- Interaction effect results of triple superphosphate fertilizer and zinc sulfate on quinoa grain P/Zn ratio

تیمار Treatment	کود سوپر فسفات تریپل Triple superphosphate fertilizer ($mg.kg^{-1}$)											
	0 $mg.kg^{-1}$			6 $mg.kg^{-1}$			12 $mg.kg^{-1}$			18 $mg.kg^{-1}$		
	سولفات روی Zinc sulfate ($g.L^{-1}$)											
	0	4	8	0	4	8	0	4	8	0	4	8
محتوای فسفر به روی دانه Grain P/Zn ratio	80.89	73.37	64.52	59.70	74.63	88.37	75	81.74	81.41	97.79	93.96	86.34
LSD 5%	9.91											

میانگین‌ها به صورت مستقل با آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد مقایسه شدند.

The means were independently compared with the LSD test at the 5% probability level.

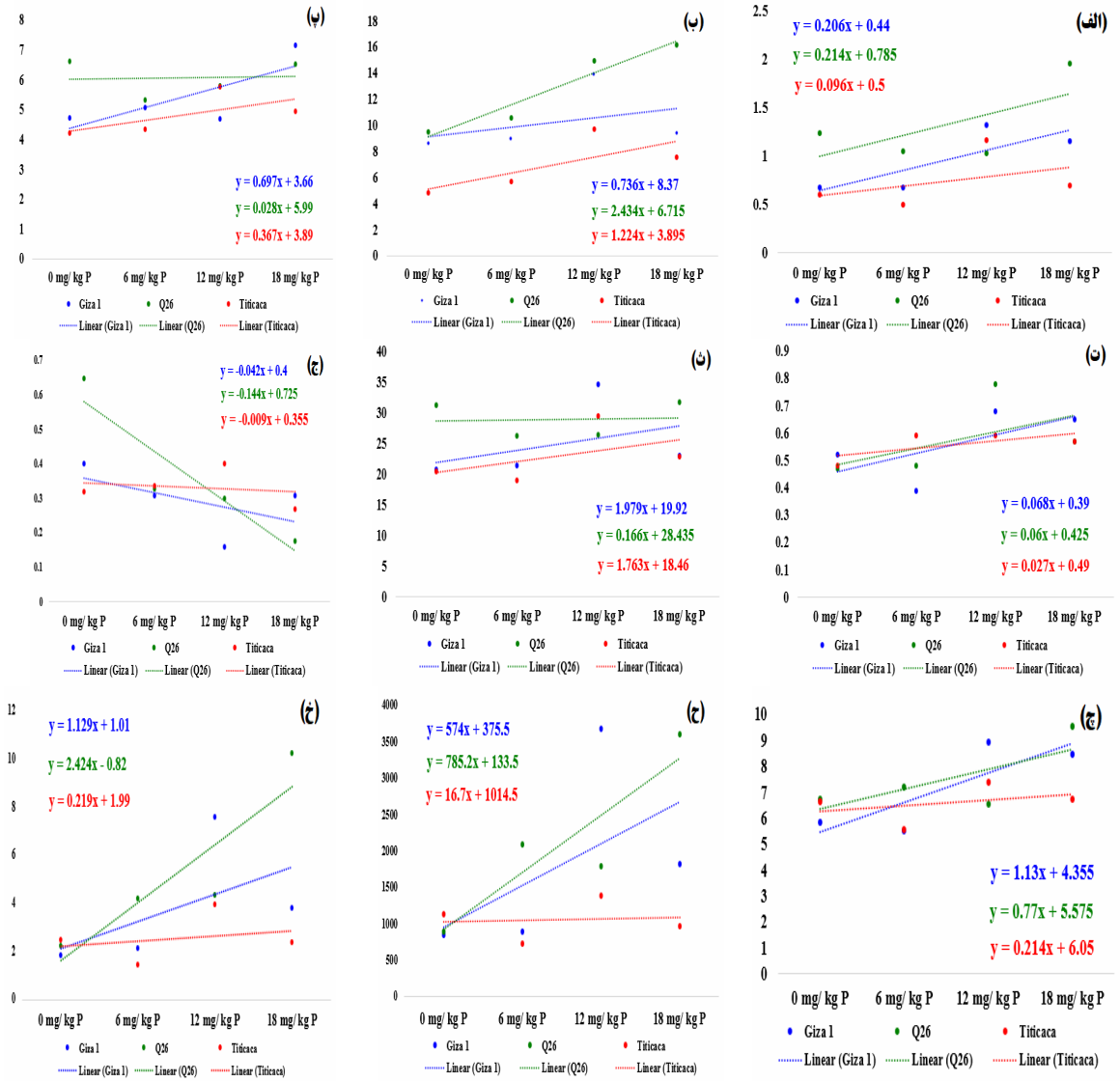
جدول ۵- نتایج برهم‌کنش عامل‌های آزمایش بر پارامترهای مورد بررسی

Table 5- Interaction effect of experimental factors on the studied parameters

رقم (Cultivar)		رقم گیزا وان (Giza 1 cultivar)			رقم کیو ۲۶ (Q26 cultivar)			رقم تی تی کاکا (Titicaca cultivar)		
تیمار Treatment		طول خوشه Panicle length (cm)	تعداد دانه در بوته Number of grains per plant	وزن خشک دانه Grain dry weight ($g.plant^{-1}$)	طول خوشه Panicle length (cm)	تعداد دانه در بوته Number of grains per plant	وزن خشک دانه Grain dry weight ($g.plant^{-1}$)	طول خوشه Panicle length (cm)	تعداد دانه در بوته Number of grains per plant	وزن خشک دانه Grain dry weight ($g.plant^{-1}$)
عدم مصرف کود فسفر (شاهد) P_0	آب بدون سولفات روی (شاهد) Zn_0	4.13	400	0.73	5.36	519	1.20	5.86	432	0.95
	غلظت ۴ در هزار سولفات روی Zn_4	7.30	1174	2.46	8.16	1493	3.58	8.23	2455	5.31
	غلظت ۸ در هزار سولفات روی Zn_8	6.06	958	2.30	6.66	650	1.85	5.83	515	1.11
۶ میلی گرم بر کیلوگرم فسفر P_6	آب بدون سولفات روی (شاهد) Zn_0	5.9	1014	2.56	7.53	4298	7.60	6.06	1024	1.76
	غلظت ۴ در هزار سولفات روی Zn_4	5.33	912	2.16	7.43	868	2.43	5.56	499	1.09
	غلظت ۸ در هزار سولفات روی Zn_8	5.26	736	1.69	6.66	1131	2.49	5.06	677	1.38
۱۲ میلی گرم بر کیلوگرم فسفر P_{12}	آب بدون سولفات روی (شاهد) Zn_0	9.06	4891	7.8	4.53	1025	2.18	6.90	591	1.64
	غلظت ۴ در هزار سولفات روی Zn_4	10.4	3639	9.20	6.93	1100	2.53	9.20	2945	8.57
	غلظت ۸ در هزار سولفات روی Zn_8	7.36	2524	5.8	8.16	3257	8.35	6.10	622	1.60
۱۸ میلی گرم بر کیلوگرم فسفر P_{18}	آب بدون سولفات روی (شاهد) Zn_0	11.06	2824	4.75	7.86	3520	8.67	7.03	637	1.69
	غلظت ۴ در هزار سولفات روی Zn_4	9.13	1049	2.33	12.93	4542	14.3	5.23	1119	2.46
	غلظت ۸ در هزار سولفات روی Zn_8	5.16	1602	4.25	7.76	2755	7.65	7.06	1160	2.90
LSD		1.04	240.58	0.48	1.04	240.58	0.48	1.04	240.58	0.48

میانگین‌ها به صورت مستقل با آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد مقایسه شدند.

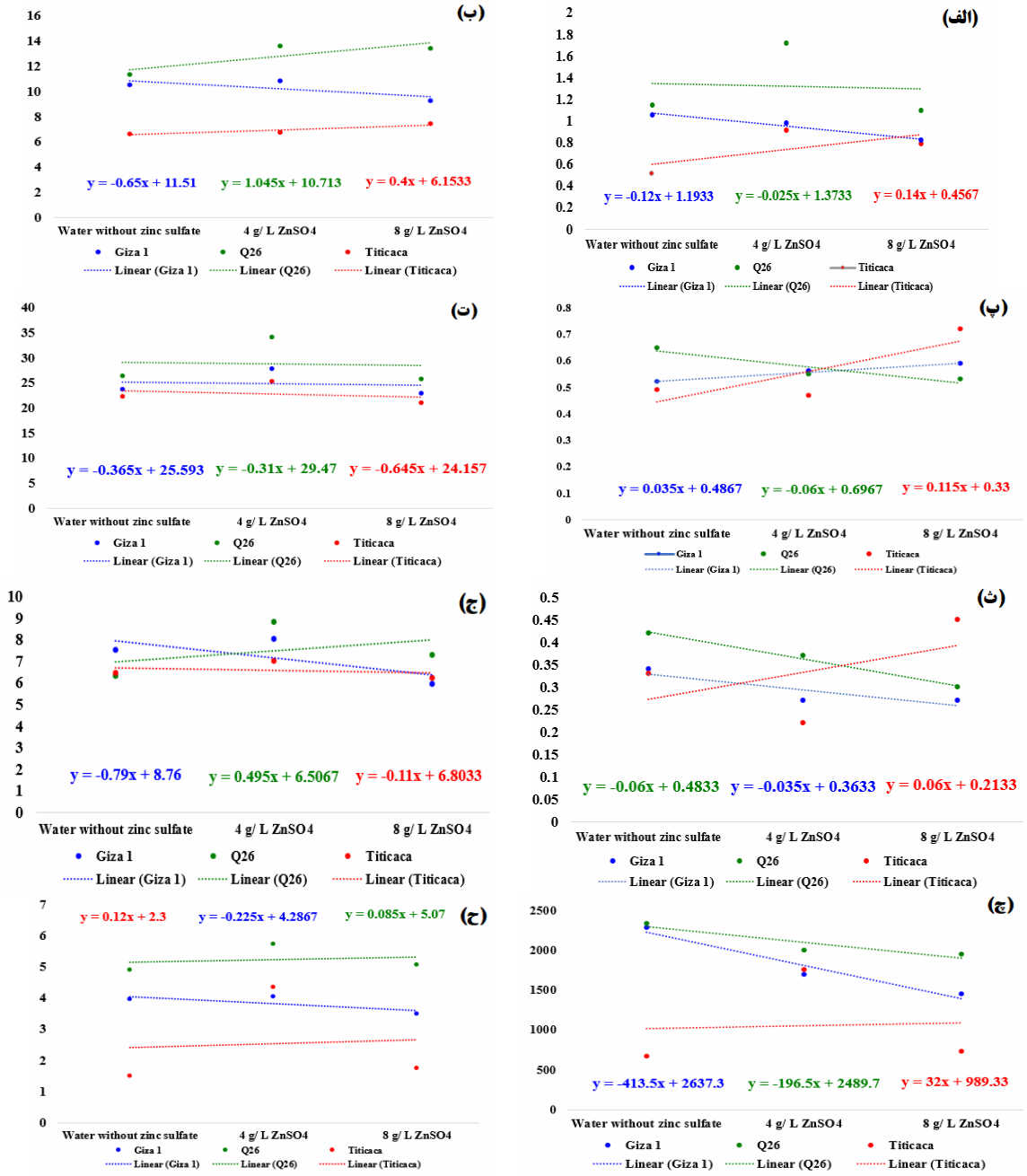
The means were independently compared with the LSD test at the 5% probability level



شکل ۱- ارتباط رگرسیونی پارامترهای مورد بررسی با تغییر مقادیر کود سوپرفسفات تریپل در ارقام کینوا

Figure 1- Regression relationship of studied parameters by changing the amount of triple superphosphate fertilizer in quinoa cultivars

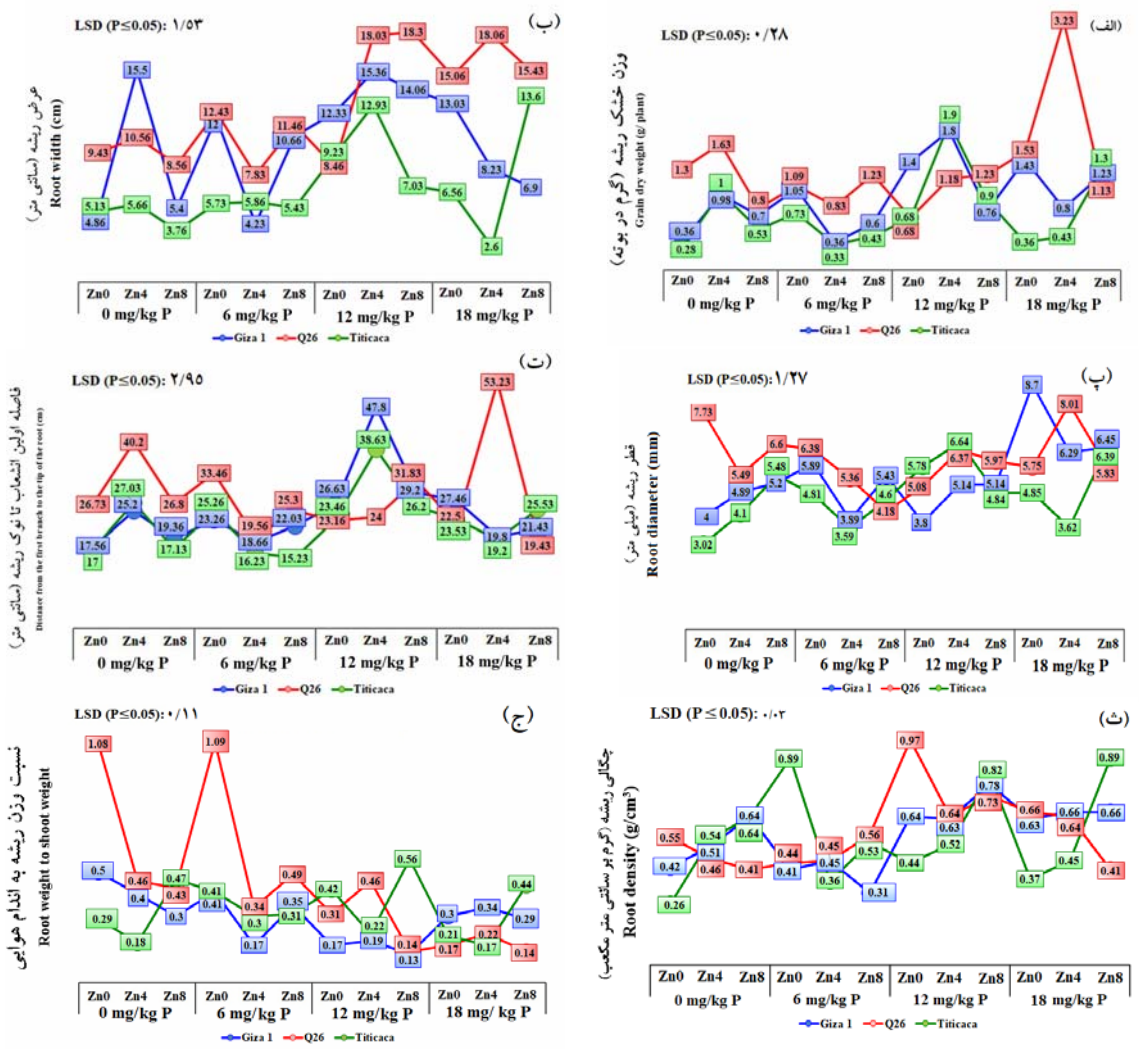
الف: وزن خشک ریشه (گرم در بوته) (Root dry weight ($g.plant^{-1}$))، ب: عرض ریشه (سانتی‌متر) (Root width (cm))، پ: قطر ریشه (میلی‌متر) (Root diameter (mm))، ت: چگالی ریشه (گرم بر سانتی‌متر مکعب) (Root density ($g.cm^{-3}$))، ث: فاصله اولین انشعاب تا نوک ریشه (سانتی‌متر) (Distance from the first branch to the tip of the root)، ج: نسبت وزن ریشه به اندام هوایی (Root weight to shoot weight)، چ: طول خوشه (سانتی متر) (Panicle length (cm))، ح: تعداد دانه در بوته (Number of grains per plant)، خ: وزن خشک دانه (گرم در بوته) (Grain dry weight ($g.plant^{-1}$))



شکل ۲- ارتباط رگرسیونی پارامترهای مورد بررسی با تغییر مقادیر سولفات روی در ارقام کینوا

Figure 2- Regression relationship of studied parameters by changing the amount of zinc sulfate in quinoa cultivars

الف: وزن خشک ریشه (گرم در بوته) (Root dry weight ($g.plant^{-1}$))، ب: عرض ریشه (سانتی‌متر) (Root width (cm))، پ: چگالی ریشه (گرم بر سانتی‌متر مکعب) (Root density ($g.cm^{-3}$))، ت: فاصله اولین انشعاب تا نوک ریشه (سانتی‌متر) (Distance from the first branch to the tip of the root (cm))، ث: نسبت وزن ریشه به اندام هوایی (Root weight to shoot weight)، ج: طول خوشه (سانتی‌متر) (Panicle length (cm))، چ: تعداد دانه در بوته (Number of grains per plant)، ح: وزن خشک دانه (گرم در بوته) (Grain dry weight ($g.plant^{-1}$))



شکل ۳- نتایج برهم‌کنش عامل‌های آزمایشی بر ریشه گیاه کینوا

Figure 3- Interaction effect results of experimental factors on quinoa root

میانگین‌ها به صورت مستقل با آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد مقایسه شدند.

The means were independently compared with the LSD test at the 5% probability level.

Zn_0: آب بدون سولفات روی، Zn_4: غلظت ۴ در هزار سولفات روی، Zn_8: غلظت ۸ در هزار سولفات روی

Zn_0: water without zinc sulfate, Zn_4: 4 $g.L^{-1}$ concentration of zinc sulfate, Zn_8: 8 $g.L^{-1}$ concentration of zinc sulfate

جدول ۶- نتایج تجزیه رگرسیون وزن خشک دانه و پارامترهای ریشه‌ای

Table 6- Regression analysis of grain dry weight and root parameters

گام (Step)		اول (First)	دوم (Second)	سوم (Third)
Constant number	عدد ثابت	-0.67	1.43	1.01
Root dry weight	وزن خشک ریشه	4.51^{**}	5.21^{**}	4.35^{**}
Root width	عرض ریشه		-0.52^{ns}	-0.61^{ns}
Root diameter	قطر ریشه			0.18^{ns}
R^2 (%)	ضریب تبیین (درصد)	66.97	69.94	72.74

ns، *، **، به‌ترتیب غیر معنی‌داری، معنی‌داری در سطح احتمال پنج و یک درصد.

ns, *, **, non-significant, significant at five and one percent probability levels, respectively.

References منابع مورد استفاده

- Abdollahpour, H., E. Tohidi Nejad, and A. Pasandi Pour. 2021. Effect of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on morphophysiological characteristics and yield of quinoa seed (*Chenopodium quinoa* Willd). *Journal of Crop Ecophysiology*. 15(57): 57-72. (In Persian).
- Armin, M., and A. Keyvanlou. 2015. The effect of methanol foliar application on morphological characteristics of maize roots and shoots under drought stress. *Journal of Crop Production Research*. 7 (1): 27-39 .(In Persian).
- Bagheri, M. 2018. Quinoa agriculture manual, Seed and Plant Breeding Research Institute. 45 pp. (In Persian).
- Bazile, D., S.E. Jacobsen, and A. Verniau. 2016. The global expansion of quinoa: trends and limits. *Frontiers in Plant Science*. 7: 622: 1-6.
- Bidabadi, S. S., M. Afazel, and S.D. Poodeh. 2016. The effect of vermicompost leachate on morphological, physiological and biochemical indices of Stevia rebaudiana Bertoni in a soilless culture system. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*. 5: 251–262.
- Bilalis, D.J., I. Roussis, I. Kakabouki, and A. Folina. 2019. Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) crop under Mediterranean conditions: A Review. *Ciencia e Investigación Agraria.* 46 (2): 51-68.
- Enfejari, M., and H. Bayat. 2017. Effects of bulb dipping time in complete NPK fertilizer on qualitative and quantitative traits of tuberose (*Polianthes tuberosa* L. cv. Double). Soil-Plant Relationships. 9 (1): 53-62. (In Persian).
- Erbas, S., Z. Kucukyumuk, H. Baydar, L. Erdal, and A. Sanli. 2017. Effects of different phosphorus doses on nutrient concentrations as well as yield and quality characteristics of Lavandin (*Lavandula × intermedia* Emeric ex Loisel. var. Super). *Turkish Journal of Field Crops.* 22 (1): 32-38.
- Fageria, N. K. 2014. Nitrogen management in crop production. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Fakhri, Sh., A. Rahnama, and M. Maskar Bashi. 2017. Genetic diversity of growth traits and shoots of wheat seedlings and its relationship with salinity tolerance. *Journal of Plant Process and Function.* 6 (21): 115-125. (In Persian).
- Farhadian Asgarabadi, K., and H. Isvand. 2017. The effect of application of mycorrhiza and superabsorbent polymer on some root morphological characteristics and yield of chickpea in dryland conditions. *Journal of Crop Production*. 10 (2): 73-61. (In Persian).
- Ganjali, A., M. Kafi, and M. Sabet Teymouri. 2010. Changes in physiological indices of roots and shoots of chickpea (*Carthamus tinctorius* L.) in response to drought stress. *Journal of Environmental Stresses in Agricultural Sciences*. 3 (1): 45 -35. (In Persian).
- Garcia-Parra, M., R. Stechauner-Rohringer, D. Roa-Acosta, D. Ortiz-Gonzalez, J. Ramirez-Correa, N. Plazas-Leguizamon, and A. Colmenares-Cruz. 2020. Chlorophyll fluorescence and its relationship with physiological stress in *Chenopodium quinoa* Willd. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 48 (4): 1742-1755 .
- Golabi, M., S. Lak, A. Gilani, M. Alavi Fazel, and A. Egdernezhad. 2022. Growth index, yield and yield components of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) cultivars affected by date and method of planting at Ahvaz region. *Journal of Crop Ecophysiology*. 16 (63): 411-434. (In Persian).
- Gordillo-Bastidas, E., D. A. Díaz-Rizzolo, E. Roura, T. Massanés, and R. Gomis. 2016. Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd), from nutritional value to potential

health Benefits: An integrative review. *Journal of Nutrition and Food Sciences*. 6 (3): 1-10.

- Hossein Alipour, B., A. Rahnama, and A. Farrokhian Firoozi. 2020. The effect of drought stress on wheat root growth and architecture at vegetative growth stage. *Iranian Journal of Crop Science.* 51 (1): 63-75. (In Persian).
- Jami Moeini, M., S.A.M. Modarres Sanavy, P. Keshavarz, A. Sorooshzadeh, and A. Ganjeali, 2010. Relationship between root morphological properties and nitrogen utilization efficiency in six cultivars of potato. *Iranian Journal of Field Crops Research.* 8 (3): 444-454. (In Persian).
- Khalili Rad, R., and H. Mirseyed Hosseini, H. 2016. Investigation of some root morphological characteristics and efficiency indices in a number of phosphorus and inefficient cultivars of wheat. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*. 6 (3): 65-82. (In Persian).
- Khalili, S. 2017. Effect of salinity stress, phosphorus and zinc stress on quinoa growth. M.Sc. Thesis. Shahed University, 96 pp. (In Persian).
- Khan, W., M. Faheem, M.Y. Khan Sh. Hussain, M.A. Maqsood, and T. Aziz. 2015. Zinc requirement for optimum grain yield and zinc biofortification depends on phosphorus application to wheat cultivars. *Romanian Agricultural Research*. 32: 1-10.
- Khavarinejad, R. F., F. Najafi, and R. Firozeh. 2011. Effect of zinc sulphate on physiological parameters on bean crop. *Crop Science Research*. 21 (1): 1-14 .
- Mai, W., X. Tian W.J. Gale, X. Yang, and X. LU. 2011. Tolerance to Zn deficiency and P-Zn interaction in wheat seedlings cultured in chelator-buffered solutions. *Journal of Arid Land*. 3 (3): 206−213.
- Mansouri, M., M. Alavi Fazel, A. Gilani, S. Lak, and M. Mojdam, 2021. Effect of nitrogen fertilizer rates and its split application on yield and nitrogen use efficiency of quinoa (*Chenopodium quinoa* willd.) cultivars. *Journal of Crop Ecophysiology*. 15 (59): 317-340. (In Persian).
- Mesbah, R., M.R. Ardakani, A. Moghaddam, and F. Rafiei. 2021. Effect of biofertilizer and biochar applications on quantitative, qualitative yields and root characteristics of flue-cured tobacco (*Nicotiana tobacum* L.) under dryland farming condition. *Journal of Crop Ecophysiology*. 15 (58): 229-250. (In Persian).
- Mostafavi Rad, M., A. Nobahar, and A. Mahboub Khomeini. 2018. Nutrition management in rapeseed agriculture. Publication of Guilan Agricultural and Natural Resources Research and Training Center. 24 pp .(In Persian).
- Mousavi, S., Gh. Mohammadi, R. Baradaran, M.J. Seghe Eslami, and A. Amiri. 2015. The effect of nitrogen fertilizer on morphological traits, yield and yield components of three rice cultivars. *Iranian Journal of Field Crops Research*. 13 (1): 152-146. (In Persian).
- Mousavi, S.A., A. Shokuhfar, Sh. Lak, M. Mojaddam, and M. Alavifazel. 2020. Integrated application of biochar and bio-fertilizer improves yield and yield components of Cowpea under water-deficient stress. *Italian Journal of Agronomy*. 15 (2): 94-101.
- Mubarak, I., and M. Janat. 2021. Quinoa response to different transplanting dates and nitrogen fertilization levels in an arid environment. *Italian Journal of Agrometeorology*. 2: 77-89 .
- Naseri, R., M. Barari, M.J. Zare, K. Khavazi, and Z. Tahmasebi. 2018. The effect of plant growth promoting bacteria and mycorrhizal fungi on wheat root characteristics at different levels of phosphorus fertilizer. *Journal of Soil Biology*. 6(2): 137-156. (In Persian).

- Nemček, L., M. Šebesta, M. Urík, M. Bujdoš, E., Dobročka, and I. Vávra. 2020. Impact of bulk ZnO, ZnO nanoparticles and dissolved Zn on early growth stages of barley-a pot experiment. *Plants*. 9 (10) 1365: 1-14.
- Olsen, S. R., C.V. Cole, F.S. Watanabe, and L.A. Dean. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. U.S. Department of Agriculture.
- Pang, C., Z. Zhang, and Y. Zhang. 2017. Effects of water and phosphorus coupling on root growth, biomass allocation and yield of quinoa. *Scientia Agricultura Sinica*. 50: 4107–4117.
- Parentoni, S.N., and C.L. de Souza Júnior. 2008. Phosphorus acquisition and internal utilization efficiency in tropical maize genotypes. Pesquisa. *Agropecuaria Bras., Brasíleira*. 43 (7): 893-901.
- Rajaie, M., and A.H. Ziaeyan. 2009. Combined effect of zinc and boron on yield and nutrients accumulation in corn. *International Journal of Plant Production*. 3 (3): 435-440.
- Ramezani, A., M. Solhi, and M. Rezaei. 2017. Effect of zinc fertilizer foliar application on grain yield and zinc content of rice cultivar Sazandegi. *Iranian Agricultural Research.* 16 (1): 125-136. (In Persian).
- Sánchez-Rodríguez, A.R., M.D. Rey, H. Nechate-Drif, M.A. Castillejo, J.V. Jorrín-Novo, J. Torrent, M.C. del Campillo, and D. Sacristán. 2021. Combining P and Zn fertilization to enhance yield and grain quality in maize grown on Mediterranean soils. *Scientific Reports*. 11 (1): 1-14.
- Sepahvand, N. 2013. Investigation of compatibility, agronomic, phenological and qualitative value of quinoa plant products in Iran. Final Report, Seed and Plant Breeding Research Institute, Agricultural Scientific and Research Information and Procurement Center, Registration No. 44026. (In Persian).
- Sepehri, A., E. Chitsaz, N. Gharebaghli, and M. Saman. 2017. Effect of zinc and iron sulfate on yield and kaempferol content of chicory (*Cichorium intybus* L.) under drought stress. *Plant Production Technology*. 17 (1): 99-111. (In Persian).
- Seyed Sharifi, R., and N. Kamri. 2014. The effect of salinity stress and leaf nutrition with zinc nanooxide on yield and some morphophysiological characteristics of barley (*Hordeum vulgare* L.). *Iranian Agricultural Research*. 13 (2): 399-410. (In Persian).
- Staji, A., H. Rusta, and M. Roghami. 2017. Comparison of vegetative parameters and root yield of licorice (*Glycyrrhiza glabra*) in different soilless cultivation systems and soil cultivation under the influence of different nitrogen sources. *Journal of Greenhouse Crop Science and Technology*. 8 (2): 105-117. (In Persian).
- Tayafeh Soltankhani, A.M. 2011. Monthly analysis, news and Agricultural Engineering. 22 pp.
- Vaziri Kateshouri, S., M. Daneshvar, A. Sohrabi, and F. Nazarian Firoozabadi. 2013. The effect of different amounts of phosphorus on agricultural crops (*Cicer arietinum* L.) foliar application of iron and zinc on grain yield and yield components of chickpea. *Agricultural Journal of Abu Reihan Campus*. 15 (2):17-30. (In Persian).
- Yavuz, T., and K. Karadag. 2015. The effect of fertilization and grazing applications on root length and root biomass of some rangeland grasses. *Turkish Journal of Field Crops*. 20 (1): 38-42.

Research Article DOI: 10.30495/JCEP.2023.1933283.1810

Evaluation of Root Growth Dynamics and Yield Components of Quinoa (*Chenopodium quinoa*) Cultivars by Changing Phosphorus and Zinc Levels

Anise Jorfi[1], Mojtaba Alavifazel[1]*, Abdolali Gilani[1&2], Mohammad Reza Ardakani[3] and Shahram Lack[1]

Received: June 2021 , Revised: 10 November 2021, Accepted: 1 February 2022

Abstract

Proper distribution of plant root facilitates the uptake of nutrients and improves crop yields. This study aims to evaluate the root and shoot structure of quinoa cultivars in response to the application of phosphorus and zinc in the Research, Agricultural Education and Natural Resources Center of Khuzestan province in a factorial design with three factors including the use of triple superphosphate fertilizer at four levels (0, 6, 12, 18 $mg.kg^{-1}$ soil weight), foliar application of zinc sulfate in three amounts (water without zinc sulfate (control), foliar application at 4 and 8 per thousand concentrations) and three quinoa cultivars (Giza 1, Q26, Titicaca) were performed in pot and in three replications. The results showed that root parameters such as root dry weight, root width, root diameter, distance from the first branch to the tip root, and the weight ratio of root to shoot were affected by phosphorus fertilizer levels and quinoa cultivars ($P \leq 0.01$) and foliar application of zinc sulfate had a significant effect only on root dry weight, root width, distance from the first branch to the root tip, root density, root weight to shoot weight, and aerial part parameters. Q26 cultivar was identified as the best cultivar in terms of root structure development, which at 18 $mg.kg^{-1}$ phosphorus levels and 4 per thousand zinc sulfate concentration had a maximum root dry weight (3.23 $g.plant^{-1}$), root width (18.06 cm) and distance from the first branch to the root tip (53.23). At these levels of element consumption, the highest number of grains per plant (4542) were obtained in cultivar Q26. Based on the experiment results, the optimal level of elements by reducing antagonistic effects and increasing synergistic effects of P and $ZnSO_4$ led to the root structure development, improved element uptake and increased production components of quinoa cultivars.

Key words: Root, Number of grains per plant, Triple superphosphate, Zinc sulfate, Genotype, Quinoa.

1- Department of Agronomy, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.
2- Department of Seed and Plant Improvement Research, Khuzestan Agricultural and Natural Resources Research Center, AREEO, Ahvaz, Iran.
3- Department of Agronomy, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran.
**Corresponding Author: mojtaba_alavifazel@yahoo.com*