

کارایی زراعی نیتروژن و واکنش ارقام کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd.) به تلقیح با ازتوباکتر تحت سطوح مختلف کود نیتروژن

Agronomic efficiency of nitrogen and response of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) cultivars to inoculation with *Azotobacter* at varying nitrogen application levels

زهرا علی نژاد سرپرده^۱، غلامرضا خواجویی نژاد^{۲*}، عنایت الله توحیدی نژاد^۳، جلال قنبری^۴

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد اکولوژی گیاهان زراعی، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
۲. استاد گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، (نگارنده مسئول)
۳. دانشیار گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان
۴. موسسه تحقیقات ثبت و گواهی بذر و نهال، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمان.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۰ - شناسانه برنمود رقمی: 10.22092/aj.2026.369734.1701

چکیده

علی نژاد سرپرده، ز.، خواجویی نژاد، غ.، توحیدی نژاد، ع.، قنبری، ج.، . کارایی زراعی نیتروژن و واکنش ارقام کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd.) به تلقیح با ازتوباکتر تحت سطوح مختلف کود نیتروژن

نشریه پژوهش های کاربردی زراعی دوره ۳۷ - شماره ۳- پیاپی ۱۴۴ پائیز ۱۴۰۳ صفحه: ۶۴-۴۱

کارایی زراعی نیتروژن و واکنش ارقام کینوا (تیتیکا و ردکارینا) به تلقیح با ازتوباکتر (*Azotobacter chroococcum*) در شرایط کاربرد سطوح نیتروژن (۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد مقدار توصیه شده) مورد ارزیابی قرار گرفت. این آزمایش به صورت کرت های خرد شده-فاکتوریل بر پایه طرح بلوک های کامل تصادفی در سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه شهید باهنر کرمان در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ اجرا شد. در پایان دوره رشد، صفاتی از قبیل ارتفاع گیاه، تعداد پانیکول در بوته، تعداد دانه در پانیکول، تعداد دانه در بوته، وزن هزار دانه، عملکرد دانه در واحد سطح و کارایی تلقیح باکتری، کارایی کوددهی و کارایی مصرف نیتروژن اندازه گیری شد. نتایج نشان داد که ارتفاع و تعداد پانیکول در رقم ردکارینا بیشتر از تیتیکا بود. بیشترین تعداد دانه در بوته از تلقیح با باکتری در شرایط کوددهی ۱۰۰ درصد حاصل شد که با شرایط تلقیح در کوددهی ۵۰ درصد تفاوت معنی داری نشان نداد. همچنین، رقم ردکارینا در شرایط عدم کوددهی و ۵۰ درصد کوددهی، به ترتیب ۳۴ و ۳۳ درصد تعداد دانه بیشتر و وزن هزار دانه کمتر (به ترتیب ۲۱ و ۲۲ درصد) نسبت به رقم تیتیکا نشان داد. تلقیح با ازتوباکتر عملکرد دانه و کارایی مصرف نیتروژن را ۱۵ درصد نسبت به عدم تلقیح افزایش داد. علاوه بر این، کاربرد ۱۰۰ درصد کوددهی نسبت به شاهد ۲۹/۳ درصد عملکرد دانه و ۲۵/۷ درصد کارایی مصرف نیتروژن را بهبود داد اما با ۵۰ درصد تفاوت معنی داری نشان نداد. بیشترین کارایی زراعی نیتروژن در تیتیکا و ردکارینا (به ترتیب ۱۲/۶ و ۱۰/۹ کیلوگرم دانه/کیلوگرم کود مصرفی برای) از ۵۰ درصد کوددهی در تلقیح با باکتری حاصل شد. با این وجود، تلقیح در رقم ردکارینا با افزایش سطح کود به ۱۰۰ درصد، کارایی زراعی کوددهی نیتروژن را نسبت به عدم تلقیح بهبود داد که بیانگر پاسخ بهتر ردکارینا به فراهمی نیتروژن دارد. کارایی تلقیح باکتری در رقم ردکارینا با افزایش سطح کاربرد کود به ۳۴ درصد بهبود یافت. در مقابل، رقم تیتیکا در شرایط کاربرد ۵۰ درصد کود، بالاترین کارایی (۳۴/۳ درصد) را نشان داد؛ بنابراین می تواند در شرایط محدودیت تأمین نیتروژن، کارایی بالاتری داشته باشد.

واژه های کلیدی: باکتری محرک رشد، تیتیکا، ردکارینا، کارایی تلقیح باکتری، کارایی مصرف نیتروژن، کود شیمیایی.

مقدمه

تقریباً نیمی از غذای تولیدی در جهان با استفاده از کودهای سنتزی نیتروژنه تولید می شود و این روند صعودی از ۸۰ به ۱۸۰ میلیون تن تا سال ۲۰۵۰ پیش بینی می شود (Bindraban *et al.*, 2015). به طور کلی، کاربرد کودهای نیتروژنه تهدیدی جدی برای محیط زیست به شمار می رود (Zhang *et al.*, 2015). در این شرایط، پایداری کشاورزی نیازمند ارائه رویکردهای جدید برای افزایش کارایی و مدیریت صحیح کاربرد کودهای شیمیایی در کشاورزی است. حدود نیمی از کل نیتروژن کاربردی از طریق آبشویی، دنتریفیکاسیون و تبخیر تلف شده و توسط گیاهان قابل جذب نیست که مسائل زیست محیطی مختلفی را موجب شده که می تواند اثرات مخربی بر جا گذارد (Lescourret *et al.*, 2015; Singh *et al.*, 2020).

در این شرایط، پاسخگویی به تقاضای روزافزون غذا، به ویژه در کشورهای در حال توسعه، نیاز به ارائه رویکردهایی برای افزایش تولید کشاورزی به صورت پایدار دارد که با کاهش اثرات نامطلوب بر حاصلخیزی خاک و مخاطرات زیست محیطی، تولید غذا را در بستری پایدار انجام دهد (Aasfar *et al.*, 2021). افزایش کارایی جذب و کارایی مصرف عناصر غذایی در نهایت منجر به افزایش کارایی استفاده از کودهای شیمیایی سنتزی شده و با کاهش مصرف کودهای شیمیایی به خصوص کودهای نیتروژنه می تواند با افزایش پایداری تولید و افزایش سلامت محیط زیست، بر سلامت انسان تأثیر گذار باشد (Kraiser *et al.*, 2011).

تامین نیاز گیاه به نیتروژن به دلیل متحرک بودن این عنصر در خاک همچنان چالش برانگیز است. در این راستا، بهره برداری صحیح از منابع زیستی برای تثبیت زیستی نیتروژن، می تواند در افزایش بهره وری نیتروژن مؤثر باشد (Aasfar *et al.*, 2021). کاربرد این نهاده ها از جمله باکتری های محرک رشد گیاه (PGPB) به عنوان یک روش مؤثر زراعی برای افزایش جذب نیتروژن و افزایش کارایی کاربرد کودها و در نتیجه بهبود تغذیه گیاه در نظر گرفته می شود (Consentino *et al.*, 2022; Romero-Perdomo *et al.*, 2017). در بین باکتری های غیرهم زیست تثبیت کننده نیتروژن، جنس های *Azotobacter* و *Azospirillum* بیشتر در فرایند تولید گیاهان زراعی شناخته شده هستند و کارایی قابل توجه آنها گزارش شده است (Consentino *et al.*, 2021; Aasfar *et al.*, 2022). در این میان، *Azotobacter* از تنوع بالایی برخوردار بوده و در خاک های مختلف در سطح جهان گسترش فراوانی دارد (Chaudhary *et al.*, 2013; Das & Saha, 2007). علاوه بر این، گزارش شده که گونه های ازتوباکتر علاوه بر افزایش قابلیت دسترسی نیتروژن، قابلیت بهبود تغذیه فسفر را نیز دارا می باشند (Velmourougane *et al.*, 2019). میزان تثبیت نیتروژن در خاک توسط این باکتری های از ۰/۳ تا ۶۰ کیلوگرم در هکتار در سال گزارش شده است (Aasfar *et al.*, 2021; Kizilkaya, 2009; Saha *et al.*, 2017). بنابراین، می توان از آنها برای تامین بخشی از نیاز کودی نیتروژن برای گیاهان استفاده کرد

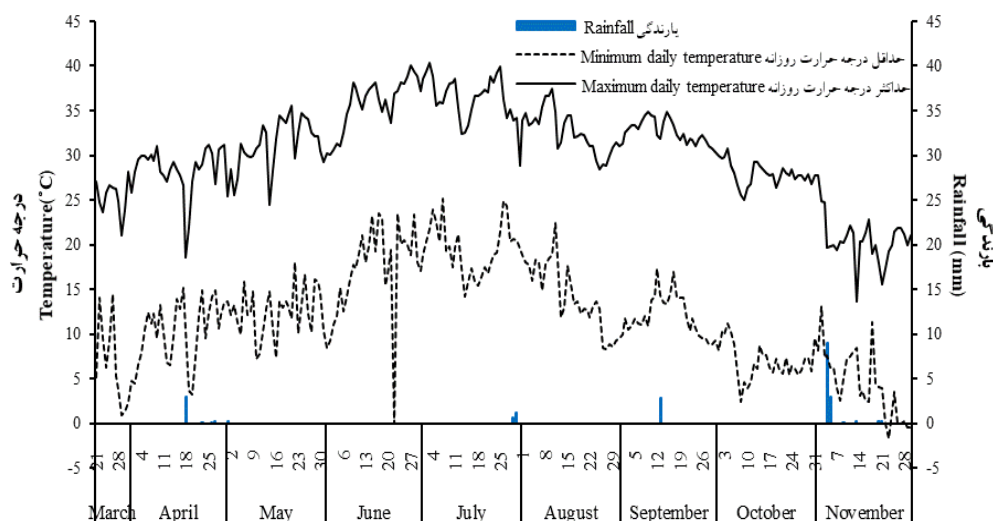
۱ Plant growth-promoting bacteria

(Wani et al., 2016).

یک راهکار عملی دیگر جهت کاهش مصرف نهاده‌های شیمیایی و دستیابی به اهداف کشاورزی پایدار، توسعه کشت گیاهانی امیدبخش است که از ارزش غذایی بالایی برخوردار بوده و قابلیت تولید و عملکرد قابل قبول در زمینهای زراعی مواجه با محدودیت‌های مختلف از جمله حاصلخیزی کم یا محدودیت‌های فیزیکوشیمیایی را داشته باشند. کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd.) به عنوان گیاهی با تنوع ژنتیکی بالا و تطابق‌پذیری مناسب به اقلیم‌های مختلف و کارایی بالای استفاده از منابع آب، می‌تواند گیاه مناسبی برای استفاده از منابع آب محدود و خاکهای شور باشد (Adolf et al., 2013; Lavini et al., 2014). علاوه بر این، پروتئین موجود در دانه‌های کینوا دارای کیفیت بالایی است و از نظر داشتن اسیدآمینه لیزین نسبت به غلات و از نظر داشتن اسیدآمینه‌های متیونین و سیستئین نسبت به حبوبات برتری دارد (Jaikishun et al., 2019). گیاه کینوا با وجود ارزش غذایی بالا، مقاومت زیادی نیز در برابر طیف گسترده‌ای از تنشهای غیرزیستی مانند سرما، شوری و خشکی از خود نشان داده است و قابلیت رشد در زمین‌های حاشیهای را دارد. این عوامل سبب شده که توسعه کینوا به عنوان یک گیاه مناسب در راستای دستیابی به سیاست‌های جهانی کشاورزی پایدار مورد توجه قرار گیرد. به نحوی که براساس آخرین آمار منتشر شده توسط فائو (FAOSTAT, 2023)، سطح زیر کشت جهانی این گیاه از ۳۶ هزار هکتار در سال ۱۹۸۰ به ۱۶۶ هزار هکتار و میزان تولید جهانی

در این سال به ۱۱۲ هزار تن رسیده است.

نتایج کاربرد سطوح مختلف نیتروژن نشان داد که عملکرد دانه کینوا با افزایش سطح کاربرد نیتروژن افزایش می‌یابد (Choukr-Allah et al., 2016). با این حال، کارایی مصرف نیتروژن با افزایش میزان کاربرد نیتروژن در کینوا کاهش یافته است (Shams, 2011). در مطالعه‌ای دیگر، گیاهان کینوا بهترین عملکرد را در تیمار دریافت ۲۳۸ کیلوگرم در هکتار نترات آمونیوم در ترکیب با کود زیستی نشان دادند (Gomaa, 2013). نتایج مطالعه دیگری نشان داد که با کاربرد ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار N عملکرد دانه بدون کاهش کارایی مصرف کود و کارایی مصرف نیتروژن بهبود یافته است (Schulte auf'm Erley et al., 2005). در این مطالعه، با کاربرد مقادیر نیتروژن ۰، ۸۰ و ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار، نتایج نشان داد که عملکرد دانه کینوا بین ۱۷۹۰ تا ۳۴۹۵ کیلوگرم دانه در هکتار بود و به شدت به کوددهی نیتروژن پاسخ داد. بهره‌وری مصرف نیتروژن در این سطوح کاربرد، با افزایش میزان کاربرد نیتروژن کاهش پیدا نکرد. نتایج نشان داد که عملکرد دانه در مقدار کاربرد ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار نسبت به عدم کاربرد ۱۹۴ درصد افزایش یافت اما در مقایسه با سطح کاربرد ۸۰ کیلوگرم در هکتار تفاوت معنی‌داری نشان نداد. همچنین نتایج نشان داد که ارقام مورد بررسی کینوا از نظر شاخص برداشت متفاوت بودند (Schulte auf'm Erley et al., 2005). در ارزیابی واکنش عملکرد کینوا به سه سطح کود نیتروژن (۰، ۸۰ و ۱۶۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار)، نتایج نشان داد که تمامی صفات مورد



شکل ۱- برخی پارامترهای اقلیمی منطقه اجرای آزمایش طی فصل رشد کینوا

Figure 1. Some climatic parameters of the experimental area during the quinoa growing season

مورد نیاز می توانند در بهبود و افزایش عملکرد کینوا مؤثر واقع شوند، Amiryousefi *et al.*, 2020). یافته های مطالعه ای نشان داد که ارتفاع بوته، زیست توده گیاه، عملکرد دانه، محتوا و عملکرد پروتئین دانه کینوا را در ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن به همراه ازتوباکتر و میکوریزا به طور معنی داری افزایش یافت (Paradkar *et al.*, 2022). تحت شرایط گلخانه ای، سویه های باکتری *Bacillus* و *Azotobacter chroococcum* و *polymyxa* در تلفیق با کمپوست رشد و کیفیت بذر کینوا را بهبود بخشید (Mousa *et al.*, 2022). به طور کلی، یافته ها بیانگر اثرات مفید تلقیح با باکتری های محرک رشد بر رشد و بهبود عملکرد گیاه در شرایط کاهش کوددهی

بررسی با افزایش تیمارهای کود نیتروژن به طور معنی داری افزایش یافت اما کارایی مصرف نیتروژن به طور قابل توجهی با افزایش نرخ کود نیتروژن کاهش یافت (Almadini *et al.*, 2019). در مطالعه ای دیگر، کاربرد خاک با نیتروژن ۷۵ کیلوگرم در هکتار بهترین سطح نیتروژن برای دستیابی به حداکثر برداشت اقتصادی کینوا گزارش شد (Basra *et al.*, 2014).

گزارش شده که تیمار تلفیق کودهای شیمیایی و کودهای زیستی بیشترین تأثیر را بر افزایش عملکرد کینوا داشت. در نتیجه، کودهای زیستی نیتروکسین و بیوفسفر، به تنهایی قادر به تأمین کامل عناصر غذایی مورد نیاز این گیاه نبوده اما در تلفیق با کودهای شیمیایی

جدول ۱- ویژگی های فیزیکی-شیمیایی خاک محل کاشت گیاه کینوا

Table 1- Physico-chemical characteristics of the soil of study site of quinoa cultivation

پتاسیم قابل جذب	فسفر قابل جذب	نیتروژن	ظرفیت تبادل	قابلیت هدایت الکتریکی	pH	کربن آلی	وزن مخصوص ظاهری	بافت
Available Potassium (mg kg ⁻¹)	Available Phosphorus (mg kg ⁻¹)	Total N (%)	کاتیونی CEC (meq 100 g ⁻¹)	EC (mS cm ⁻¹)		Organic carbon (%)	Bulk density (g cm ⁻²)	Texture
205.7	2.97	0.04	4.5	4.02	7.6	0.5	1.46	لوم رسی Clay loam

شیمیایی است که می‌تواند رویکردی مفید ضمن حفظ رشد و عملکرد گیاه باشد و بهبود کارایی مصرف کودهای نیتروژنه را به همراه داشته باشد. بر این اساس، هدف از این مطالعه، بررسی اثر تلفیقی باکتری محرک رشد گیاه و سطوح کودها نیتروژن بر عملکرد و اجزای عملکرد و بهبود کارایی مصرف نیتروژن گیاه کینوا در جهت بهبود کارایی زراعی کوددهی بود.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ در قسمتی از مزرعه تحقیقاتی دانشگاه شهید باهنر کرمان با مشخصات جغرافیایی؛ عرض جغرافیایی: ۳۰ درجه و ۱۴ دقیقه شمالی، طول جغرافیایی: ۵۷ درجه و ۰۷ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۷۷۳ متر از سطح دریا به مرحله اجرا در آمد. اطلاعات هواشناسی مربوط به دوره اجرای آزمایش در شکل ۱ ارائه شده است.

قبل از کاشت گیاه، خصوصیات مختلف فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه محل انجام آزمایش با نمونه‌برداری از نقاط مختلف زمین و از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری خاک مزرعه از به صورت تصادفی انجام و مورد آزمایش قرار گرفت (جدول ۱).

این تحقیق به صورت کرت‌های خرد شده-فاکتوریل بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار اجرا شد. در این آزمایش، فاکتور اصلی شامل تیمارهای کود نیتروژن بود. تلقیح بذر با ازتوباکتر و ارقام کینوا به صورت فاکتوریل در کرت‌های فرعی مورد بررسی قرار گرفت.

تیمارهای کود شیمیایی اوره در ۳ سطح

شامل، ۱- شاهد (بدون کاربرد کود شیمیایی)، ۲- کوددهی ۱۰۰ درصد نیاز غذایی گیاه (۱۰۰ درصد کاربرد) ۳- کوددهی ۵۰ درصد نیاز غذایی گیاه اعمال شد. اثر تلقیح با کود زیستی در دو سطح شامل عدم تلقیح با کود زیستی به عنوان شاهد و تلقیح بذر با باکتری ازتوباکتر (*Azotobacter chroococcum*) مورد بررسی قرار گرفت. ارقام مورد بررسی در این آزمایش شامل دو رقم تیتیکاکا و ردکارینا بودند که ویژگی‌های متفاوتی در الگوی رشد رویشی نشان می‌دهند. این ارقام از ارقام اروپایی ثبت شده هستند. ردکارینا در کشور هلند و تیتیکاکا در دانمارک اصلاح و معرفی شده‌اند (Jacobsen, 2017). رقم تیتیکاکا زودرس بوده و ردکارینا در گروه میان‌رس قرار می‌گیرد و هر دو رقم به طول روز بی تفاوت هستند (Bagheri, 2018). بذور ارقام مورد بررسی از طریق سازمان جهاد کشاورزی استان کرمان از موسسه تحقیقات اصلاح تهیه نهال و بذر تهیه شد.

پس از انتخاب زمین مورد نظر، عملیات تهیه فیزیکی و شیمیایی زمین دو هفته قبل از کاشت صورت گرفت و کاشت بذور ارقام مختلف کینوا در تاریخ ۳۱ تیر ماه انجام شد. کشت به صورت خطی و در هر کرت، پنج خط به فاصله ۵۰ سانتی‌متر و به طول ۲ متر انجام و کرت‌ها بلافاصله آبیاری شد. فاصله بوته‌ها روی ردیف ۱۰ سانتی‌متر تنظیم گردید، به‌طوری‌که تراکم ۲۰ بوته در متر مربع حاصل شد (Najafinezhad et al., 2022).

مایه تلقیح باکتری مورد نظر از بخش تحقیقات شرکت زیست فناور سبز، تهران، تهیه

شد. باکتری محرک رشد ($10^7-10^8 \text{ CFU g}^{-1}$) به نسبت ۱۰ گرم در ۵۰۰ میلی لیتر آب مقطر تهیه شده و جهت اطمینان از تلقیح، مایه تلقیح در دو مرحله اعمال شد. در مرحله اول بذرها کینوا به صورت خیساندن بذر در مایه تلقیح در آزمایشگاه تیمار شد. در مرحله دوم، مایه تلقیح در ردیف کاشت هنگام کاشت بذر اعمال شد. هم زمان با کاشت بذر، براساس مقادیر نیتروژن در سطوح کودی مورد بررسی، پنجاه درصد کود نیتروژن و تمام کودهای پتاسیم و فسفر بر مبنای آزمون خاک و نیاز غذایی کینوا (Schulte auf'm Erley *et al.*, 2005; Paradkar *et al.*, 2022) در خاک اعمال شد. مابقی مقدار نیتروژن در یک نوبت دیگر در مرحله ابتدای رشد زایشی به صورت سرک در اختیار گیاه قرار گرفت. پس از سبز شدن گیاهچه‌ها، عملیات داشت شامل تنک بوته‌ها و کنترل علف‌های هرز به طور یکنواخت برای کرت‌های مختلف بر حسب نیاز در مراحل مختلف رشد انجام پذیرفت. علف‌های هرز به صورت دستی کنترل شد. آبیاری به صورت غرقابی و هر هفت روز یک‌بار انجام شد.

در پایان دوره رشد، صفاتی از قبیل ارتفاع گیاه، تعداد پانیکول در بوته، تعداد دانه در پانیکول، تعداد دانه در بوته، وزن هزار دانه با برداشت ۵ بوته در هر کرت اندازه گیری شد. عملکرد دانه در واحد سطح با برداشت از یک متر مربع سطح هر کرت تعیین و کارایی تلقیح باکتری، کارایی کوددهی و کارایی مصرف نیتروژن اندازه گیری شد.

کارایی زراعی کاربرد کود نیتروژن^۲ (AEN) براساس رابطه زیر محاسبه شد:

$$\text{AEN (kg kg}^{-1}\text{)} = (Y_t - Y_0) / \text{FN}$$

Y_t عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) به ازای مقدار معین کاربرد کود نیتروژن (FN) بر حسب کیلوگرم در هکتار در هر سطح کاربرد و Y_0 عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) در تیمار عدم کوددهی و عدم تلقیح با باکتری (Xu *et al.*, 2012).

کارایی مصرف نیتروژن^۳ (NUE) در تیمارهای مختلف مورد ارزیابی، براساس رابطه زیر براساس عملکرد دانه (Y) بر حسب کیلوگرم در هکتار به ازای نیتروژن کل شامل محتوای نیتروژن خاک و نیتروژن اضافه شده در کوددهی (TN) بر حسب کیلوگرم در هکتار مورد محاسبه قرار گرفت (Ghanbari & Khajoei-Nejad, 2022).

$$\text{NUE} = Y / \text{TN}$$

جهت ارزیابی کارایی تلقیح باکتریایی در افزایش عملکرد دانه در سطوح مختلف کاربرد کودهای نیتروژنه، اثربخشی تلقیح باکتری (BIE)^۴ از اختلاف عملکرد دانه تولیدی در شرایط تلقیح (Y_t) و عدم تلقیح (Y_0) حاصل شد:

$$\text{BIE} = \frac{Y_t - Y_0}{Y_t} \times 100$$

جهت تجزیه‌های مرتبط آماری، مقایسه میانگین و رسم نمودارها به ترتیب از نرم افزارهای SAS نسخه ۹.۰، MSTAT-C و Excel

^۲Agronomic efficiency of nitrogen fertilizer

^۳Nitrogen use efficiency

^۴Bacteria inoculation effect (BIE)

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر کوددهی، تلقیح با باکتری و رقم بر رشد، اجزای عملکرد، عملکرد دانه و کارایی مصرف نیتروژن کینوا
Table 2 - Analysis of variance (mean squares) of the effect of fertilization, bacterial inoculation, and cultivar on growth, yield components, grain yield and nitrogen use efficiency of quinoa

منابع تغییر Sources of variation	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean squares						کارایی مصرف نیتروژن Nitrogen use efficiency
		ارتفاع بوته Plant height	تعداد پانیکول در بوته Number of panicles/ plant	تعداد دانه در پانیکول Number of grains / panicle	تعداد دانه در بوته Number of grains/ plant	وزن هزار دانه Thousand- grain weight	عملکرد دانه Grain yield	
بلوک Block	2	14.9	0.150	4343	60591	0.275	48366	0.015
کود Fertilizer	2	505.6 ^{ns}	0.281 ^{ns}	76315*	1044941**	0.178*	706285**	0.157**
بلوک×کود Block×Fertilizer	4	187.8	0.259	10648	45608	0.019	18584	0.006
باکتری Bacteria	1	5.9 ^{ns}	0.700*	2907 ^{ns}	1144222 ^{ns}	0.096 ^{ns}	401001*	0.123*
رقم cultivar	1	1431.4**	0.853*	70584 ^{ns}	3146544*	0.348 ^{ns}	32264 ^{ns}	0.010 ^{ns}
کود×باکتری Fertilizer×Bacteria	2	37.7 ^{ns}	0.184 ^{ns}	138132 ^{ns}	2493976*	0.279 ^{ns}	180750 ^{ns}	0.057 ^{ns}
کود×رقم Fertilizer× cultivar	2	28.1 ^{ns}	0.227 ^{ns}	114483 ^{ns}	2228805*	0.712*	7385 ^{ns}	0.002 ^{ns}
باکتری×رقم Bacteria× cultivar	1	198.8 ^{ns}	0.003 ^{ns}	24064 ^{ns}	115294 ^{ns}	0.050 ^{ns}	20591 ^{ns}	0.005 ^{ns}
کود×باکتری×رقم Fertilizer×Bacteria×cultivar	2	183.1 ^{ns}	0.037 ^{ns}	12100 ^{ns}	221240 ^{ns}	0.027 ^{ns}	171581 ^{ns}	0.051 ^{ns}
خطا Error	18	71.5	0.135	68488	452988	0.125	70621	0.022
ضریب تغییرات (درصد) CV (%)	-	7.5	11.2	22.1	17.5	17.6	17.3	17.3

** : معنی دار در سطح احتمال یک درصد، * : معنی دار در سطح احتمال پنج درصد و ^{ns} : غیر معنی دار

** : Significant at 1% probability level, * : Significant at 5% probability level, and ^{ns} : Not significant.

استفاده شد. مقایسه میانگین‌ها به روش آزمون
LSD در سطح احتمال ۵ درصد (LSD، 05/0
>P) انجام شد.

نتایج و بحث

رشد و اجزای عملکرد

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که از بین عوامل مورد بررسی، ارتفاع بوته تنها در بین ارقام مختلف تفاوت معنی داری نشان داد و سایر عوامل و اثر متقابل آن‌ها بر این صفت معنی دار نبود (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین‌ها بین ارقام مورد بررسی نشان داد که رقم ردکارینا به طور معنی داری (۱۱/۳ درصد) ارتفاع بوته بیشتری نسبت به تیتیکاکا داشت (جدول ۳).
تعداد پانیکول در بوته تحت تأثیر رقم و

تلقیح با باکتری قرار گرفت (جدول ۲)، نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که ردکارینا ۹/۶ درصد تعداد پانیکول بیشتری در بوته نسبت به رقم تیتیکاکا تولید کرد (جدول ۳). همچنین تلقیح با باکتری منجر به افزایش ۹ درصدی تعداد پانیکول در بوته نسبت به عدم تلقیح شد (جدول ۴).

ردکارینا رقمی با ارتفاع بوته بالاتر نسبت به تیتیکاکا بود. همچنین تعداد پانیکول بیشتری نیز در این رقم نسبت به تیتیکاکا مشاهده شد (جدول ۳). این ویژگی‌ها به خصوصیات ژنتیکی ارقام بستگی دارد. در همین زمینه در بررسی واکنش ارقام تیتیکاکا و ردکارینا کینوا، تنوع قابل توجهی در سرعت رشد گزارش شد. نتایج

جدول ۳- مقایسه ویژگی های رشد، اجزای عملکرد، عملکرد دانه و کارایی مصرف نیتروژن در بین ارقام کینوا

Table 3- Comparison of growth characteristics, yield components, grain yield, and nitrogen use efficiency between quinoa cultivars

رقم Cultivar	ارتفاع بوته (سانتی متر) Plant height (cm)	تعداد پانیکول در بوته Number of panicles per plant	تعداد دانه در پانیکول Number of seeds per panicle	تعداد دانه در بوته Number of seeds per plant	وزن هزاردانه (گرم) Thousand-seed weight (g)	عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) Grain yield (kg.ha ⁻¹)	کارایی مصرف نیتروژن (کیلوگرم/کیلوگرم) Nitrogen use efficiency (kg.kg ⁻¹)
ردکارینا Redcarina	118 ^a	3.43 ^a	1227 ^a	4150 ^a	1.91 ^a	1566 ^a	0.872 ^a
تیتیکا Titicaca	106 ^b	3.12 ^b	1139 ^a	3559 ^a	2.11 ^a	1506 ^a	0.839 ^a

در هر ستون، میانگین ها با حرف مشترک فاقد اختلاف معنی دار آماری براساس آزمون حداقل تفاوت معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد می باشند (LSD, $P \leq 0.05$).
In each column, means with the same letter are not statistically significantly different based on the least significant difference test at the 5% probability level (LSD, $P \leq 0.05$).

جدول ۴- اثر تلقیح با ازتوباکتر بر ویژگی های رشد، اجزای عملکرد، عملکرد دانه و کارایی مصرف نیتروژن کینوا

Table 4- Effect of inoculation with Azotobacter on growth characteristics, yield components, grain yield and nitrogen use efficiency of quinoa

تلقیح با باکتری Bacterial inoculation	ارتفاع بوته (سانتی متر) Plant height (cm)	تعداد پانیکول در بوته Number of panicles per plant	تعداد دانه در پانیکول Number of seeds per panicle	تعداد دانه در بوته Number of seeds per plant	وزن هزاردانه (گرم) Thousand- weight (g)	عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) Seed yield (kg.ha ⁻¹)	کارایی مصرف نیتروژن (کیلوگرم/کیلوگرم) Nitrogen use efficiency (kg.kg ⁻¹)
عدم تلقیح No inoculation	112 ^a	3.13 ^b	1174 ^a	3676 ^a	1.96 ^a	1430 ^b	0.797 ^b
تلقیح با ازتوباکتر Azotobacter inoculation	113 ^a	3.41 ^a	1192 ^a	4033 ^a	2.06 ^a	1641 ^a	0.914 ^a

در هر ستون، میانگین ها با حرف مشترک فاقد اختلاف معنی دار آماری براساس آزمون حداقل تفاوت معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد می باشند (LSD, $P \leq 0.05$).
In each column, means with the same letter are not statistically significantly different based on the least significant difference test at the 5% probability level (LSD, $P \leq 0.05$).

تعداد دانه در پانیکول نشان نداد. همچنین، اعمال سطح ۵۰ درصد کود نیتروژن از این نظر با شاهد تفاوت معنی داری نشان نداد (جدول ۵).

نتایج تجزیه واریانس حاکی از اثر معنی دار کوددهی، رقم، برهم کنش کوددهی × تلقیح با باکتری و کوددهی × رقم بر تعداد دانه در بوته بود (جدول ۲). همان طور که نتایج مقایسه میانگین ها (شکل ۲) نشان می دهد، بیشترین تعداد دانه در بوته از تلقیح با باکتری در شرایط کوددهی ۱۰۰ درصد حاصل شد که با شرایط تلقیح در کوددهی ۵۰ درصد تفاوت معنی داری نشان نداد. تلقیح با باکتری تنها در شرایط کوددهی ۱۰۰ درصد نسبت به عدم تلقیح افزایش معنی داری در تعداد دانه در بوته ایجاد

این مطالعه حاکی از برتری رقم ردکارینا از نظر پتانسیل رشد رویشی و تولید زیست توده نسبت به رقم تیتیکا بود (Golestani Far *et al.*, 2024). همچنین تفاوت بین ژنوتیپ های مختلف کینوا از نظر زمان رسیدگی و پارامترهای رویشی در مطالعه دیگر نیز نشان داده شده است (Basra *et al.*, 2014).

برای تعداد دانه در پانیکول، تنها بین سطوح کوددهی تفاوت معنی داری در سطح احتمال پنج درصد مشاهده شد (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین ها نشان داد که اعمال سطح کوددهی ۱۰۰ درصد منجر به افزایش ۱۴ درصدی تعداد دانه در پانیکول نسبت به شاهد شد اما نسبت به کاربرد سطح ۵۰ درصد، تفاوت معنی داری در

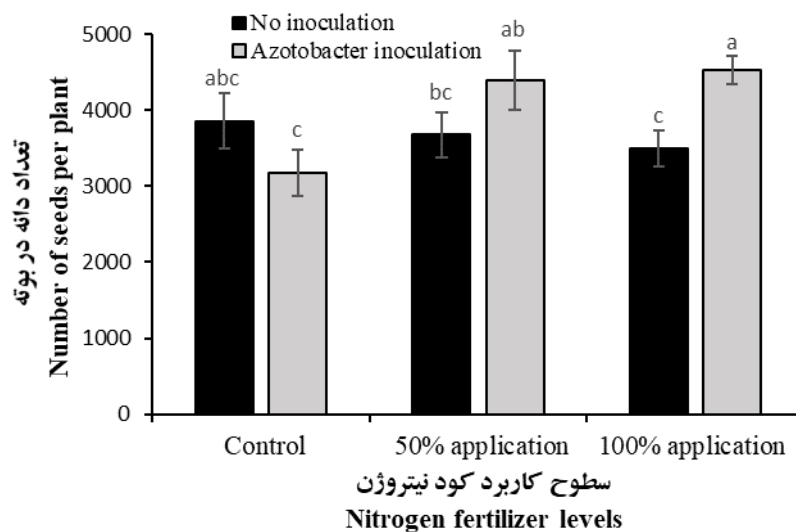
جدول ۵- اثر سطوح مختلف کود نیتروژن بر ویژگی های رشد، اجزای عملکرد، عملکرد دانه و کارایی مصرف نیتروژن کینوا

Table 5- Effect of nitrogen fertilizer levels on growth characteristics, yield components, grain yield, and nitrogen use efficiency of quinoa

سطوح کود نیتروژن Nitrogen fertilizer levels	ارتفاع بوته (سانتی متر) Plant height (cm)	تعداد پانیکول در بوته Number of panicles per plant	تعداد دانه در پانیکول Number of seeds per panicle	تعداد دانه در بوته Number of seeds per plant	وزن هزار دانه (گرم) Thousand-seed weight (g)	عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) Seed yield (kg.ha ⁻¹)	کارایی مصرف نیتروژن (کیلوگرم/کیلوگرم) Nitrogen use efficiency (kg.kg ⁻¹)
شاهد Control	109 ^a	3.19 ^a	1110 ^b	3514 ^b	1.88 ^b	1260 ^b	0.724 ^b
۵۰ درصد کاربرد 50% application	120 ^a	3.45 ^a	1171 ^{ab}	4036 ^a	2.03 ^{ab}	1629 ^a	0.910 ^a
۱۰۰ درصد کاربرد 100% application	108 ^a	3.18 ^a	1268 ^a	4014 ^a	2.12 ^a	1718 ^a	0.933 ^a

در هر ستون، میانگین ها با حرف مشترک فاقد اختلاف معنی دار آماری براساس آزمون حداقل تفاوت معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد می باشند (LSD, $P \leq 0.05$).

In each column, means with the same letter are not statistically significantly different based on the least significant difference test at the 5% probability level (LSD, $P \leq 0.05$).



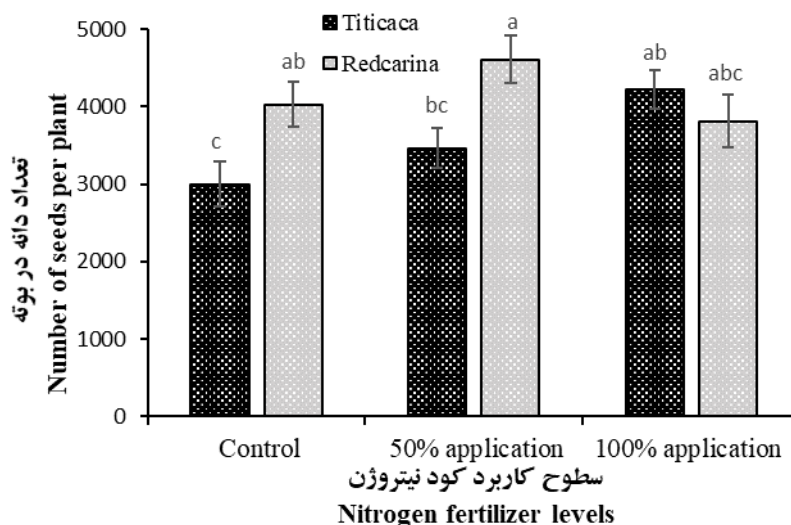
شکل ۲- تعداد دانه در بوته کینوا تحت تأثیر برهم کنش کوددهی نیتروژن و تلقیح با باکتری ازتوباکتر.

Figure 2- Number of seeds per plant in quinoa affected by the interaction effect of nitrogen fertilization and inoculation with *Azotobacter* bacteria.

با این وجود، در شرایط کاربرد ۱۰۰ درصد کوددهی، تیتیکا واکنش بهتری نشان داد ولی تفاوت معنی داری از نظر تعداد دانه در مقایسه با رقم ردکارینا مشاهده نشد. نتایج همچنین نشان داد که رقم تیتیکا از نظر تعداد دانه در بوته به افزایش سطوح کود نیتروژن واکنش مثبتی نشان داد و با افزایش سطح کاربرد، تعداد دانه را افزایش داد در حالی که در رقم ردکارینا تعداد دانه در بوته واکنش معنی داری به افزایش

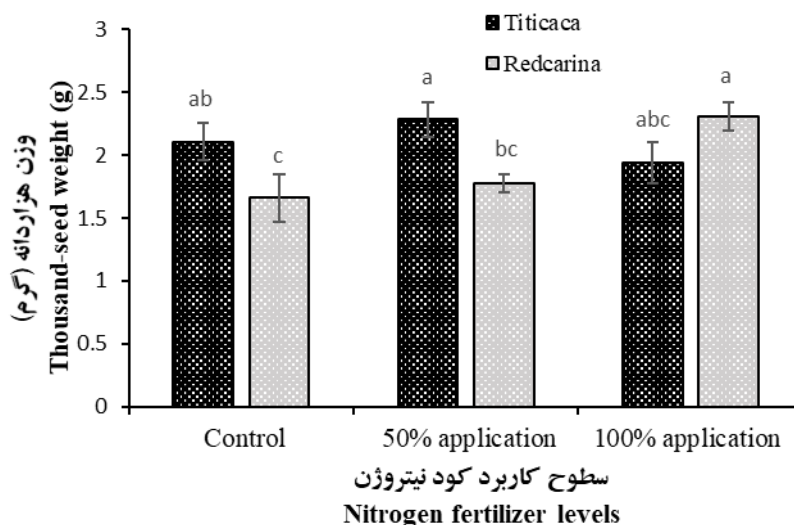
کرد و در شرایط ۵۰ درصد کوددهی و شاهد، اثر معنی داری از تلقیح با باکتری بر تعداد دانه در بوته مشاهده نشد (شکل ۲).

نتایج همچنین بیانگر تفاوت در پاسخ ارقام به سطوح کودی اعمال شده بود (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین ها (شکل ۳) نشان داد که رقم ردکارینا در شرایط عدم کوددهی و ۵۰ درصد کوددهی، به ترتیب ۳۴ و ۳۳ درصد تعداد دانه بیشتری در بوته نسبت به رقم تیتیکا نشان داد.



شکل ۳- تعداد دانه در بوته تحت تأثیر برهم کنش کوددهی نیتروژن و ارقام مورد بررسی کینوا.

Figure 3- Number of seeds per plant affected by the interaction effect of nitrogen fertilization and quinoa cultivars.



شکل ۴- وزن هزاردانه تحت تأثیر برهم کنش کوددهی نیتروژن و ارقام مورد بررسی کینوا.

Figure 4- Thousand-seed weight affected by the interaction effect of nitrogen fertilization and quinoa cultivars.

هزاردانه کمتری (به ترتیب ۲۱ و ۲۲ درصد) نسبت به رقم تیتیکاکا نشان داد. در مقابل، در شرایط کوددهی ۱۰۰ درصد، با وجود افزایش وزن هزاردانه در رقم ردکارینا نسبت به تیتیکاکا، تفاوت معنی داری بین ارقام مشاهده نشد (شکل ۳). با این وجود، بیشترین وزن هزاردانه از رقم ردکارینا در شرایط کوددهی ۱۰۰ درصد و

سطوح نیتروژن نشان نداد (شکل ۳).

نتایج تجزیه واریانس نشان از اثر معنی دار کوددهی و برهم کنش کوددهی و رقم بر وزن هزاردانه بود (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین ها (شکل ۴) نشان داد که بر خلاف روند مشاهده شده برای تعداد دانه در بوته، در شرایط عدم کوددهی و اعمال ۵۰ درصد کود نیتروژن، وزن

تیتیکاکا در شرایط کوددهی ۵۰ درصد حاصل شد (شکل ۴).

عملکرد دانه و کارایی مصرف نیتروژن

نتایج تجزیه واریانس داده‌های حاصل از آزمایش نشان دهنده‌ی اثر معنی‌دار تلقیح با باکتری بر عملکرد دانه و کارایی مصرف نیتروژن بود (جدول ۲). نتایج نشان داد که تلقیح با ازتوباکتر حدود ۱۵ درصد عملکرد دانه و کارایی مصرف نیتروژن را نسبت به عدم تلقیح افزایش داد (جدول ۴). علاوه بر این، عملکرد دانه و کارایی مصرف نیتروژن تحت تأثیر کوددهی قرار گرفتند (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که کاربرد ۱۰۰ درصد سطح کوددهی نسبت به شاهد ۲۹/۳ درصد عملکرد دانه و ۲۵/۷ درصد کارایی مصرف نیتروژن را بهبود داد (جدول ۵). نتایج نشان از اثر قابل توجه کوددهی در بهبود عملکرد دانه و کارایی مصرف نیتروژن در گیاه کینوا داشت. با این وجود بین سطوح کاربرد ۵۰ درصد و ۱۰۰ درصد تفاوت آماری معنی‌داری مشاهده نشد (جدول ۵). افزایش تعداد دانه در پانیکول، با وجود عدم تأثیر کوددهی بر تعداد پانیکول در بوته، منجر به افزایش تعداد دانه در بوته شد که یکی از تأثیرگذارترین اجزای عملکرد در کینواست (Almadini *et al.*, 2019). به طور مشابه تعداد دانه در بوته با افزایش سطح کوددهی در کینوا نشان داده شده است (Almadini *et al.*, 2019).

از طرف دیگر، کوددهی وزن هزاردانه را نیز بهبود داد که می‌تواند عامل دیگری در بهبود عملکرد دانه و کارایی مصرف نیتروژن باشد

(جدول ۵). نتایج نشان دهنده‌ی واکنش ارقام مورد بررسی به تیمارهای کودی از نظر وزن هزاردانه بودند. وزن هزاردانه در رقم تیتیکاکا با افزایش سطح کوددهی به ۱۰۰ کاهش یافت در حالی که در رقم ردکارینا افزایش نشان داد (شکل ۴). در همین رابطه، نتایج بررسی سطوح کودی و تلقیح ازتوباکتر نشان داد که کاربرد ۱۰۰ درصد نیتروژن افزایش قابل توجهی در وزن هزار دانه (۴۷٫۸٪) داشته و تیمار ۷۵٪ N + ازتوباکتر وزن هزاردانه گندم را ۴۲ درصد بهبود داد. در مقابل، تیمارهای ازتوباکتر و ۲۵٪ N + ازتوباکتر منجر به کاهش به ترتیب ۳۳ و ۲۷٪ در وزن دانه شدند. همچنین، اثر متفاوتی از ارقام در این بررسی به سطوح کود و تلقیح ازتوباکتر مشاهده شد. با توجه به اثر متقابل ارقام و تیمار کوددهی، رقم Giza-168 با ۱۰۰٪ نیتروژن بالاترین مقادیر وزن هزار دانه را ثبت کرد، در حالی که ارقام Misr-2 و shandawel-1 در شرایط تلقیح با ازتوباکتر کمترین مقدار را به خود اختصاص دادند (El-Sorady *et al.*, 2022). افزایش کارایی مصرف نیتروژن با وجود افزایش کاربرد میزان کود نیتروژنه نیز به دلیل تأثیر قابل توجه کوددهی بر عملکرد دانه بود که بهره‌وری مناسب کوددهی را در مقادیر به کار برده شده نشان می‌دهد. در آزمایشی به منظور ارزیابی اثر هفت سطح نیتروژن (۰، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰، ۱۲۵، ۱۵۰ و ۱۷۵ کیلوگرم در هکتار) بر عملکرد دانه و اجزای عملکرد کینوا در ترکیه انجام شد، نتایج نشان داد که اثر تیمارهای نیتروژن بر تمامی ویژگی‌های مورد آزمایش معنی‌دار بود. سطح نیتروژن ۱۵۰ کیلوگرم در

جدول ۶- نتایج تجزیه واریانس اثر کوددهی، رقم و تلقیح با باکتری بر کارایی زراعی نیتروژن در گیاه کینوا

Table 6 - Analysis of variance results of the effect of fertilization, cultivar, and bacterial inoculation on agronomic efficiency of nitrogen in quinoa plant

منابع تغییر Sources of variation	درجه آزادی df	کارایی زراعی کاربرد کود نیتروژن Agronomic efficiency of nitrogen fertilizer
بلوک Block	2	3.10
کود Fertilizer	1	47.53*
بلوک×کود Block×Fertilizer	2	0.71
باکتری Bacteria	1	175.54**
رقم Cultivar	1	0.16 ^{ns}
کود×باکتری Fertilizer×Bacteria	1	78.39**
کود×رقم Fertilizer×Cultivar	1	2.00 ^{ns}
باکتری×رقم Bacteria×Cultivar	1	1.01 ^{ns}
کود×باکتری×رقم Fertilizer×Bacteria×Cultivar	1	46.53**
خطا Error	12	3.41
ضریب تغییرات (درصد) CV (%)	-	31.6

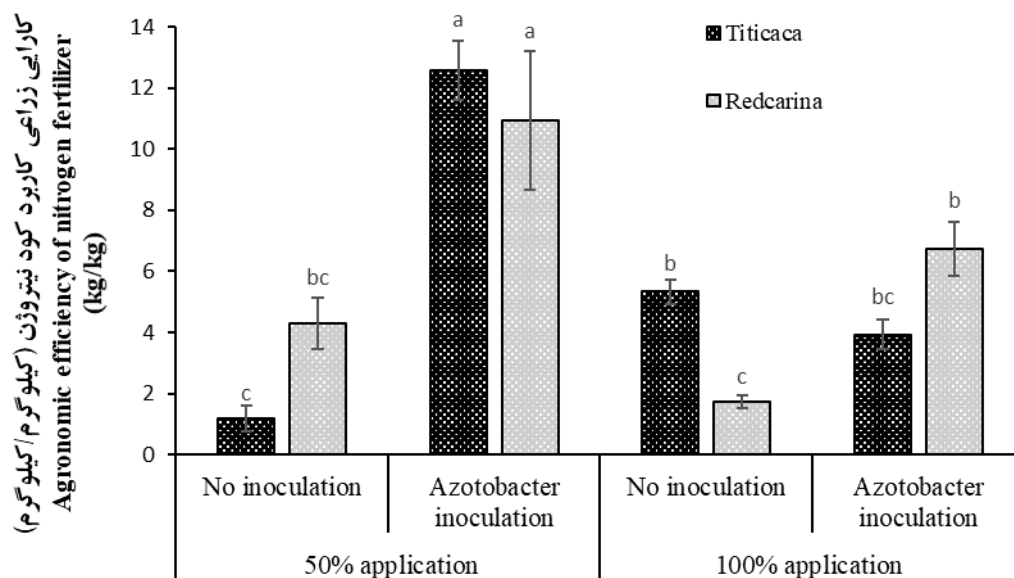
** معنی دار در سطح احتمال یک درصد، * معنی دار در سطح احتمال پنج درصد و ^{ns}: غیر معنی دار

** : Significant at 1% probability level, * : Significant at 5% probability level, and ^{ns}: Not significant.

هکتار به عنوان بهترین سطح برای تأمین نیتروژن خاک برای عملکرد دانه (۲/۹۵ تن در هکتار) و محتوای پروتئین خام (۱۶ درصد) کینوا در شرایط اکولوژیکی مدیترانه‌ای گزارش شد (Geren, 2015).

یک آزمایش مزرعه‌ای برای ارزیابی واکنش عملکرد کینوا به کوددهی نیتروژن (N)، کارایی مصرف نیتروژن (NUE) و همچنین ضریب همبستگی برای تعیین صفات مهمی که در تعیین بهره‌وری محصول کینوا نقش دارند، انجام شد. سه سطح کود نیتروژن (۰، ۸۰ و ۱۶۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار) در این آزمایش مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تمامی صفات مورد بررسی با افزایش تیمارهای کود نیتروژن به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. در مقابل، NUE

به‌طور قابل توجهی با افزایش میزان کاربرد کود نیتروژن کاهش یافت (Almadini *et al.*, 2019). تأثیر کم‌آبیاری و میزان نیتروژن بر عملکرد کینوا و کارایی مصرف نیتروژن با کاربرد مقادیر مختلف نیتروژن (۰، ۱۲۵، ۲۵۰ و ۳۷۵ کیلوگرم نیتروژن در هکتار) و رژیم های آبیاری در یک آزمایش مزرعه‌ای دو ساله ارزیابی شد. نتایج نشان داد که افزایش سطوح مصرف کود نیتروژن از ۲۵۰ به ۳۷۵ کیلوگرم نیتروژن در هکتار تفاوت معنی‌داری در عملکرد دانه و کل ماده خشک کینوا ایجاد نکرد. علاوه بر این، کارایی مصرف نیتروژن (NUE) با کاربرد ۳۷۵ کیلوگرم نیتروژن در هکتار در مقایسه با میزان به دست آمده در ۲۵۰ کیلوگرم کود نیتروژن در هکتار ۲۰ درصد کاهش نشان داد. بنابراین،



سطوح کاربرد کود نیتروژن
Nitrogen fertilizer levels

شکل ۵- کارایی زراعی کاربرد کود نیتروژن تحت تأثیر برهم کنش کوددهی، تلقیح با باکتری و ارقام مورد بررسی کینوا
Figure 5- Agronomic efficiency of nitrogen fertilizer affected by the interaction effect of fertilization, bacterial inoculation, and quinoa cultivars

و نتایج نشان داد که رشد، تولید زیست توده و عملکرد لویا در شرایط کاربرد ۷۵ درصد کود و تلقیح میکروبی بالاتر بود و تفاوت معنی داری با ۱۰۰ NPK نشان نداد (Chauhan & Bagyaraj, 2015). همچنین تلقیح بذر با آزوسپیریوم در ارقام کنجد در شرایط کاربرد ۵۰ درصد نیتروژن و فسفر در آزمایش مزرعه‌ای نشان داد که آزوسپیریوم همراه با کاربرد ۵۰ درصد کود NP در افزایش صفات زراعی و عملکرد کنجد مؤثر بودند (Nosheen et al., 2019).

کارایی زراعی کاربرد کود نیتروژن و کارایی تلقیح باکتری

نتایج تجزیه واریانس داده‌های حاصل از کارایی زراعی کود نیتروژن نشان دهنده‌ی اثر معنی دار کوددهی، تلقیح با باکتری، برهمکنش کوددهی × تلقیح با باکتری و برهمکنش کوددهی × باکتری × رقم بر این ویژگی بود

میزان مصرف نیتروژن ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار به عنوان میزان بهینه برای رسیدن به بالاترین راندمان مصرف نیتروژن (به همراه کاربرد ۱۲۵ کیلوگرم نیتروژن در هکتار) توصیه شد (Bahrani et al., 2022). همچنین نتایج مطالعه‌ای نشان داده که کاربرد میزان ۱۰۰ درصد و کاربرد ۵۰ درصد به همراه تلقیح با ازتوباکتر بدون تفاوت آماری بین دو تیمار اثرات مشابهی بر عملکرد پنبه نشان دادند. تلقیح ازتوباکتر به همراه نصف مقدار کاربرد اوره، افزایش ارتفاع و تولید زیست توده پنبه را نسبت به برنامه کوددهی ۱۰۰ درصد، نشان داد (Romero-Perdomo et al., 2017). نقش تلقیح با باکتری‌های محرک رشد شامل (*Paenibacillus polymyxa* و *Pantoea agglomerans*) و قارچ میکوریزا (*Funneliformis mosseae*) در کاهش میزان کوددهی نیتروژن به ۷۵ و ۵۰ درصد بررسی

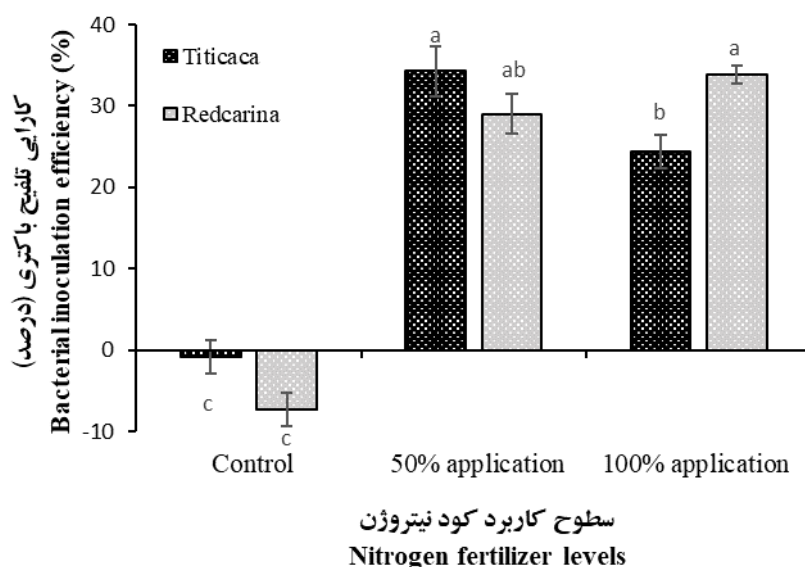
جدول ۷- نتایج تجزیه واریانس اثر کوددهی و رقم بر کارایی تلقیح ازتوباکتر در گیاه کینوا

Table 7- Analysis of variance results of the effect of fertilization and cultivar on the *Azotobacter* inoculation efficiency in quinoa plants

کارایی تلقیح باکتری Bacterial inoculation efficiency	درجه آزادی Df	منابع تغییر Sources of variation
18.2	2	بلوک Block
2387.8**	2	کود Fertilizer
8.76	4	بلوک×کود Block×Fertilizer
2.57 ^{ns}	1	رقم Cultivar
117.9*	2	کود×رقم Fertilizer×Cultivar
17.3	6	خطا Error
22.0	-	ضریب تغییرات (درصد) CV (%)

** معنی دار در سطح احتمال یک درصد، * معنی دار در سطح احتمال پنج درصد و ^{ns} غیر معنی دار

** : Significant at 1% probability level, * : Significant at 5% probability level, and ^{ns} : Not significant.



شکل ۶- کارایی تلقیح باکتری تحت تأثیر برهم کنش کوددهی و رقم در گیاه کینوا

Figure 6- Bacterial inoculation efficiency affected by the interaction effect of fertilization and cultivar in quinoa plant

مشاهده شد. در این شرایط، ارقام مورد بررسی کارایی مشابهی در مصرف کود نیتروژن نشان دادند. کمترین کارایی از رقم تیتیکاکا در شرایط عدم تلقیح با ازتوباکتر و کوددهی ۵۰ درصد حاصل شد در حالی که در رقم ردکارینا از عدم تلقیح در شرایط کوددهی ۱۰۰ درصد

(جدول ۶). نتایج بیانگر واکنش متفاوت ارقام مورد بررسی به تلقیح باکتریایی در شرایط کاربرد سطوح نیتروژن بود (شکل ۵). بیشترین کارایی زراعی نیتروژن از کاربرد ۵۰ درصد کود نیتروژن و تلقیح با ازتوباکتر برای هر دو رقم

مشاهده شد. همچنین نتایج نشان داد که تلقیح با باکتری در هر دو شرایط کوددهی کارایی مصرف کود نیتروژن را در رقم ردکارینا به طور معنی داری به ترتیب ۱۵۵ درصد و ۲۸۸ درصد در کوددهی ۵۰ درصد و ۱۰۰ درصد نسبت به شاهد بهبود داد. در مقابل، با وجود افزایش بیش از ۱۰ برابری کارایی کوددهی با تلقیح باکتریایی در رقم تیتیکاکا در شرایط کاربرد ۵۰ درصد کوددهی، تلقیح با باکتری در شرایط کاربرد ۱۰۰ درصد کود شیمیایی، اثر معنی داری بر کارایی کوددهی در این رقم نداشت (شکل ۵).

نتایج تجزیه واریانس حاصل از ارزیابی کارایی تلقیح باکتری نشان داد که کارایی تلقیح ازتوباکتر تحت تأثیر اثر کوددهی و برهم کنش کوددهی $\times$ رقم قرار گرفت در حالی که بین ارقام مورد بررسی تفاوت معنی داری مشاهده نشد (جدول ۷).

نتایج نشان داد که کارایی تلقیح در شرایط عدم کوددهی، منفی بود و بین ارقام مورد بررسی از این نظر تفاوتی مشاهده نشد. همچنین در شرایط کاربرد ۵۰ درصد کود نیتروژن، کارایی تلقیح بین ارقام تفاوت معنی داری نشان نداد اما در شرایط اعمال ۱۰۰ درصد کود، رقم ردکارینا ۳۹ درصد کارایی تلقیح بالاتری نسبت به رقم تیتیکاکا نشان داد (شکل ۶). با این وجود، کوددهی به طور کلی کارایی تلقیح را افزایش داد و بیشترین کارایی از تیتیکاکا در شرایط ۵۰ درصد کوددهی و از ردکارینا در شرایط اعمال ۱۰۰ درصد کوددهی حاصل شد. همچنین، افزایش سطح کوددهی از ۵۰ درصد به

۱۰۰ درصد، تفاوت معنی داری بر کارایی تلقیح در رقم ردکارینا نداشت در حالی که افزایش سطح کوددهی کارایی تلقیح باکتری را در رقم تیتیکاکا ۲۹ درصد کاهش داد (شکل ۶).

نیتروژن یک عنصر زراعی حیاتی برای بهبود رشد، نمو و عملکرد گیاهان است. با این حال، کاربرد آن در مقادیر نادرست می تواند ایجاد خطر را برای خاک و محیط به همراه داشته باشد. استفاده از محرک های رشد زیستی به عنوان رویکردی زراعی برای رویارویی با چالش های کاربرد کودهای نیتروژنه است که در بسیاری از پژوهش های مرتبط برای جایگزینی قسمتی از کودهای شیمیایی پیشنهاد شده است (Aasfar et al., 2021; Consentino et al., 2022; Nosheen et al., 2019; Romero-Perdomo et al., 2017). با توجه به یافته های تحقیق حاضر، استفاده از کودهای زیستی منجر به افزایش عملکرد دانه و کارایی مصرف نیتروژن شد و کاربرد آن ها همراه با ۵۰ درصد نیتروژن در درجه اول با کاهش ۵۰ درصدی کاربرد کود N، کارایی زراعی کاربرد کود نیتروژن را چندین برابر بهبود داد (شکل ۵). این یافته ها با گزارش های قبلی که اثرات مثبت و اقتصادی ترکیب کودهای زیستی با کودهای معدنی نیتروژن را گزارش کردند، مطابقت دارد (El-Sorady et al., 2022; Gupta et al., 2015). این مطالعات همچنین به منظور بررسی کارایی ترکیب کودهای زیستی با کودهای معدنی و تأثیر آن ها بر ویژگی های کمی گیاه انجام شد. طبق نتایج یک مطالعه انجام شده بر گندم، کاربرد تلفیقی کود معدنی نیتروژن و ازتوباکتر تأثیر قابل توجهی بر افزایش عملکرد دانه و

2015; El-Sorady *et al.*, 2022; Vafa *et al.*, (2021).

یک آزمایش مزرعه ای برای بررسی بهره‌وری سه رقم گندم نان (Giza-168, Shandawel-1 و Misr-2) تحت تیمارهای مختلف کوددهی شامل تلقیح ازتوباکتر، ۲۵ درصد نیتروژن (N) + ازتوباکتر، ۵۰ درصد N + ازتوباکتر، ۷۵ درصد N + ازتوباکتر، و ۱۰۰ درصد N از سطح توصیه شده ۱۸۰ کیلوگرم در هکتار انجام شد. یافته‌ها نشان داد که ارقام گندم مورد بررسی در دو فصل تنوع قابل توجهی در ارتفاع بوته، تعداد پنجه، تعداد سنبلچه در سنبله و وزن هزار دانه طول سنبله، عملکرد زیستی، عملکرد دانه، عملکرد کاه، شاخص برداشت، محتوای پروتئین و محتوای کلروفیل از خود نشان دادند. در نتیجه، Giza-168 دارای عملکرد دانه، شاخص برداشت و وزن هزار دانه بالاتر از هر یک از دو رقم دیگر در هر دو فصل رشد بود. کاربرد دو تیمار ۱۰۰٪ نیتروژن و ۷۵٪ N + ازتوباکتر عملکرد مشابهی از نظر آماری از خود نشان دادند که منجر به افزایش بیش از ۳۰ تا ۵۰٪ در تمام صفات مورد مطالعه در مقایسه با سه تیمار دیگر شد. با توجه به یافته‌های تحقیق حاضر، کاربرد کود نیتروژن همراه با ازتوباکتر، عملکرد گندم را بیش از کاربرد تنه‌ای ازتوباکتر یا نیتروژن افزایش داد. در نتیجه، کاربرد نیتروژن همراه با ازتوباکتر، مقدار نیتروژن مصرفی را ۲۵ درصد در این مطالعه کاهش و کارایی کوددهی را افزایش داد (El-Sorady *et al.*, 2022).

در همین راستا، تلقیح گیاه با *Azospirillum brasilense* در شرایط کاهش کوددهی ۳۰ یا

اجزای عملکرد و بهبود کارایی کوددهی داشت (El-Sorady *et al.*, 2022). چنین تأثیر مفیدی از ترکیب بین کودهای زیستی و معدنی را می‌توان به افزایش رشد ریشه، افزایش دسترسی به آب، افزایش فراهمی و جذب عناصر غذایی و افزایش ارتفاع گیاه، به دلیل استفاده از کودهای زیستی، به ویژه ازتوباکتر نسبت داد (Du Jardin, 2015; Vafa *et al.*, 2021). به طور مشابه، کوددهی ۱۰۰ درصد اوره و پس از آن کاربرد مقادیر کاهش یافته اوره به همراه با تلقیح با باکتری ازتوباکتر منجر به افزایش طول ریشه در پنبه شد (Romero-Perdomo *et al.*, 2017). باکتری‌های موجود در کود زیستی به دلیل ظرفیت خود برای تثبیت زیستی نیتروژن و گسترش ناحیه ریشه، سهم قابل توجهی در جذب بهینه آب و مواد مغذی و همچنین تولید هورمون‌های رشد و ویتامین‌های خاص دارند (El-Sorady *et al.*, 2022). با توجه به اثرات مشاهده شده در گیاهانی که با کودهای زیستی حاوی N تغذیه شده بودند، محققان ادعا کرده‌اند که این گیاهان تغذیه متعادل‌تری را خواهند داشت (Du Jardin, 2015). نتیجه مستقیم چنین عملکردی برای کودهای زیستی در نهایت منجر به افزایش عملکرد می‌شود. علاوه بر این، باکتری‌های موجود کودهای زیستی ساختار و فعالیت میکروبیوم‌های مفید خاک را بهبود می‌بخشند که دسترسی بهینه به آب و مواد مغذی را برای گیاهان فراهم می‌کند که به نوبه خود باعث افزایش عملکرد می‌شود. بنابراین، ارتفاع بوته، اجزای عملکرد، عملکرد زیستی و عملکرد دانه در نتیجه رابطه بین باکتری‌های تثبیت کننده N و سیستم ریشه افزایش می‌یابد (Du Jardin,

مطالعات همچنین نشان داده است که جذب نیتروژن در کینوا با کوددهی ۱۲۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار در مقایسه با عدم کوددهی، تقریباً دو برابر شد. همچنین کارایی بهره‌برداری نیتروژن نشان داد که در این شرایط، ضمن بهبود عملکرد، NUtE در مقادیر بالای تأمین نیتروژن کاهش پیدا نکرد. بنابراین، کود نیتروژن به‌طور موثر برای تولید دانه در محدوده مورد مطالعه تا ۱۲۰ کیلوگرم کود نیتروژن در هکتار می‌تواند ضمن بهبود عملکرد، کارایی کوددهی و کارایی مصرف نیتروژن را در کینوا بهبود دهد (Schulte auf'm Erley *et al.*, 2005).

ارقام مورد بررسی نیز از نظر کارایی زراعی کوددهی نیتروژن واکنش متفاوتی به تلقیح باکتری در سطوح مختلف کودی نشان دادند (شکل ۵). با وجود افزایش کارایی زراعی نیتروژن در هر دو رقم در شرایط ۵۰ درصد کوددهی در تلقیح با باکتری، در شرایط کاربرد ۱۰۰ درصد کود نیتروژن، تنها رقم ردکارینا کارایی زراعی کوددهی نیتروژن را نسبت به عدم تلقیح بهبود داد که بیانگر این است که در شرایط تأمین عنصری ارقام ممکن است کارایی متفاوتی در بهره‌برداری از نیتروژن داشته باشند. در این شرایط ردکارینا می‌تواند پاسخ بهتری به فراهمی نیتروژن داشته باشد و کارایی بالاتری در شرایط کوددهی نشان دهد. نتایج کارایی تلقیح باکتری (شکل ۶) نیز تایید کننده این نتایج بود. در رقم ردکارینا افزایش کوددهی از ۵۰ درصد به ۱۰۰ درصد، کارایی تلقیح باکتری را بهبود داد. بنابراین، این رقم به شرایط تأمین کوددهی واکنش بهتری نشان می‌دهد. رقم تیتیکاکا در

۶۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار بالاترین کارایی مصرف نیتروژن را منجر شد که به دلیل اثر این باکتری محرک رشد در بهبود تغذیه نیتروژن بود (Consentino *et al.*, 2022). مشاهدات دیگر محققین نیز تایید کننده امکان جایگزینی قسمتی از کوددهی نیتروژن با تلقیح ازتوباکتر است که ضمن بهبود کارایی مصرف نیتروژن، قابلیت افزایش کارایی زراعی کودهای نیتروژنه را نیز دارا می‌باشد (Romero-Perdomo *et al.*, 2017). نتایج مشابه کاربرد باکتری‌های محرک رشد در تلقیح با ۵۰ درصد کودهای آلی (Babakhani *et al.*, 2022) و کودهای شیمیایی (Khanamani *et al.*, 2023) گزارش شده است. همچنین، نتایج مطالعه دیگری نشان دهنده‌ی افزایش عملکرد و رشد گیاه *Pennisetum clandestinum* در تلقیح خاک با PGPR در شرایط کوددهی با میزان ۵۰ درصد کودهای آلی و ۵۰ درصد کودهای شیمیایی و تولید عملکردی مشابه با کوددهی ۱۰۰ درصد نیتروژن بود (Paungfoo-Lonhienne *et al.*, 2019).

همچنین تلقیح با ازتوباکتر در شرایط عدم کاربرد کود، کارایی زراعی منفی نشان داد (شکل ۵). نتایج مطالعات نشان دهنده این است که تلقیح با ازتوباکتر در شرایط عدم کوددهی یا کاربرد سطوح پایین کود نیتروژن، ضمن نشان دادن ارتباط منفی با صفات عملکردی گندم، کارایی لازم برای بهبود اجزای عملکرد و عملکرد گندم را نداشت (El-Sorady *et al.*, 2022). نتایج به‌طور کلی نشان دهنده محدودیت عملکرد دانه و کارایی زراعی نیتروژن در شرایط تأمین کمتر ازت در این آزمایش است. نتایج

شرایط کاربرد ۵۰ درصد کود نیتروژن، بالاترین کارایی را نشان داد که این به پتانسیل رویشی کمتر در این رقم مرتبط است. بنابراین می تواند در شرایط محدودیت تأمین نیتروژن، بالاترین کارایی را بهره برداری از نیتروژن داشته باشد. با افزایش سطح کاربرد کود به ۱۰۰ درصد، تلقیح با باکتری در این رقم نقشی در افزایش کارایی زراعی نیتروژن نداشت (شکل ۵). همین عامل منجر به کاهش کارایی تلقیح باکتری در رقم تیتیکاکا با افزایش سطح کاربرد کود شد. بیشترین کارایی تلقیح برای این رقم از کاربرد سطح ۵۰ درصد حاصل شد و با افزایش کود به ۱۰۰ درصد کارایی تلقیح در این رقم کاهش یافت (شکل ۴-۵).

نتیجه گیری

نتایج نشان داد که ردکارینا رقمی با پتانسیل رویشی بالاتر نسبت به تیتیکاکا بود. همچنین، نتایج نشان از اثر قابل توجه کوددهی و تلقیح با باکتری در بهبود عملکرد دانه و کارایی مصرف نیتروژن در گیاه کینوا داشت که به افزایش تعداد دانه در بوته و وزن هزاردانه مرتبط بود. افزایش کارایی مصرف نیتروژن با وجود افزایش کاربرد میزان کود نیتروژن نیز به دلیل تأثیر قابل توجه کوددهی بر عملکرد دانه بود که بهره وری مناسب کوددهی را در مقادیر به کار برده شده در کینوا نشان می دهد. ارقام مورد بررسی نیز از نظر کارایی زراعی واکنش متفاوتی به تلقیح باکتری در سطوح مختلف کودی نشان دادند. بیشترین کارایی زراعی نیتروژن در هر دو رقم در شرایط ۵۰ درصد کوددهی و تلقیح با باکتری بود. با این وجود، تلقیح در رقم ردکارینا با

افزایش سطح کود به ۱۰۰ درصد، کارایی زراعی کوددهی نیتروژن را نسبت به عدم تلقیح بهبود داد که بیانگر این است که در شرایط تأمین عنصری، ردکارینا می تواند پاسخ بهتری به فراهمی نیتروژن داشته باشد. نتایج کارایی تلقیح باکتری نیز تایید کننده این بود که کارایی تلقیح باکتری در رقم ردکارینا با افزایش سطح کاربرد کود، بهبود یافت. در مقابل، رقم تیتیکاکا در شرایط کاربرد ۵۰ درصد کود نیتروژن بالاترین کارایی را نشان داد. بنابراین می تواند در شرایط محدودیت تأمین نیتروژن، بالاترین کارایی زراعی نیتروژن را داشته باشد. با افزایش سطح کودی به ۱۰۰ درصد، تلقیح با باکتری در این رقم نقشی در افزایش کارایی زراعی نیتروژن نداشت. همین عامل منجر به کاهش کارایی تلقیح باکتری در رقم تیتیکاکا با افزایش سطح کاربرد کود شد. بیشترین کارایی تلقیح برای این رقم از کاربرد سطح ۵۰ درصد حاصل شد و با افزایش کود به ۱۰۰ درصد، کارایی تلقیح در این رقم کاهش یافت. بنابراین ارقام مورد بررسی را می توان با توجه به شرایط مختلف حاصل خیزی زمین زراعی، برای بهره برداری حداکثری از پتانسیل کینوا مورد استفاده قرار داد که البته این امر نیازمند مطالعات تکمیلی می باشد.

منابع

- Aasfar, A., Bargaz, A., Yaakoubi, K., Hilali, A., Bennis, I., Zeroual, Y., and Meftah Kadmiri, I. 2021. Nitrogen Fixing Azotobacter Species as Potential Soil Biological Enhancers for Crop Nutrition and Yield Stability. *Frontiers in Microbiology*, 12: 354. doi: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.628379>
- Adolf, V. I., Jacobsen, S.-E., and Shabala, S. 2013. Salt tolerance mechanisms in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Environmental and Experimental Botany*, 92: 43–54. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.07.004>
- Almadini, A. M., Badran, A. E., and Algosaibi, A. M. 2019. Evaluation of efficiency and response of quinoa plant to nitrogen fertilization levels. *Middle East Journal of Applied Sciences*, 9(4): 839–849.
- Amiryousefi, M., Tadayon, M. reza, and Ebrahimi³, R. 2020. Effect of biological and chemical fertilizers on some biochemical and yield traits of two quinoa cultivars. *Plant Process and Function*, 9(36): 299–314 (In Persian with English Summary).
- Babakhani, V., Tohidi-Nejad, E., Khajoei-Nejad, G. and Ghanbari, J. 2022. Biomass Production and Nitrogen Use Efficiency in Dill-Fenugreek Intercropping in Response to Biofertilizers and Manure. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 32(4): 1–18 (In Persian with English Summary).
- Bahrami, M., Talebnejad, R., Sepaskhah, A. R., and Bazile, D. 2022. Irrigation Regimes and Nitrogen Rates as the Contributing Factors in Quinoa Yield to Increase Water and Nitrogen Efficiencies. *Plants*, 11(15). doi: <https://doi.org/10.3390/plants11152048>
- Bagheri, M., 2018. Handbook of quinoa cultivation. Seed and Plant Improvement Institute Publication. Pp. 48 (In Persian).
- Basra, S. M. A., Shahid Iqbal, S. I., and Irfan Afzal, I. A. 2014. Evaluating the response of nitrogen application on growth, development and yield of quinoa genotypes. *International Journal of Agriculture and Biology*, 16: 886–892.
- Bindraban, P. S., Dimkpa, C., Nagarajan, L., Roy, A., and Rabbinge, R. 2015. Revisiting fertilisers and fertilisation strategies for improved nutrient uptake by plants. *Biology and Fertility of Soils*, 51(8): 897–911. doi: <https://doi.org/10.1007/s00436-015-1111-1>

org/10.1007/s00374-015-1039-7

- Chaudhary, D., Narula, N., Sindhu, S. S., and Behl, R. K. 2013. Plant growth stimulation of wheat (*Triticum aestivum* L.) by inoculation of salinity tolerant *Azotobacter* strains. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 19: 515–519.
- Chauhan, H., and Bagyaraj, D. J. 2015. Inoculation with selected microbial consortia not only enhances growth and yield of French bean but also reduces fertilizer application under field condition. *Scientia Horticulturae*, 197: 441–446. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.10.001>
- Choukr-Allah, R., Rao, N. K., Hirich, A., Shahid, M., Alshankiti, A., Toderich, K., ... Butt, K. U. R. 2016. Quinoa for Marginal Environments: Toward Future Food and Nutritional Security in MENA and Central Asia Regions. *Frontiers in Plant Science*, 7. doi: <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00346>
- Consentino, B. B., Aprile, S., Roupahel, Y., Ntatsi, G., De Pasquale, C., Iapichino, G., ... Sabatino, L. 2022. Application of PGPB Combined with Variable N Doses Affects Growth, Yield-Related Traits, N-Fertilizer Efficiency and Nutritional Status of Lettuce Grown under Controlled Condition. *Agronomy*, 12(2): 236. doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy12020236>
- Das, A. C., and Saha, D. 2007. Effect of diazotrophs on the mineralization of organic nitrogen in the rhizosphere soils of rice (*Oryza sativa*). *Journal of Crop and Weed*, 3(1): 47–51.
- Du Jardin, P. 2015. Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae*, 196: 3–14.
- El-Sorady, G. A., El-Banna, A. A. A., Abdelghany, A. M., Salama, E. A. A., Ali, H. M., Siddiqui, M. H., ... Lamlom, S. F. 2022. Response of Bread Wheat Cultivars Inoculated with *Azotobacter* Species under Different Nitrogen Application Rates. *Sustainability*, 14(14). doi: <https://doi.org/10.3390/su14148394>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2023. FAOSTAT statistical database. [Rome]: FAO.
- Geren, H. 2015. Effects of different nitrogen levels on the grain yield and some yield

- components of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) under Mediterranean climatic conditions. *Turkish Journal of Field Crops*, 20(1): 59–64.
- Ghanbari, J., and Khajoei-Nejad, G. 2022. Relationships between growth indices, dry matter production, and nutrient use efficiency in saffron: Integrative effect of mycorrhizal inoculation and nutrient resources. *Journal of Plant Nutrition*, 45(14): 2077–2095. doi: <https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2063138>
- Golestani Far, F. , Mahmoodi, S. , Fallahi, H. R. and Shahidi, A. 2024. Evaluation of Physiological Growth Analysis of some Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) Varieties under Different Moisture Levels in Spring and Summer Planting Dates at South Khorasan Region. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 22(1): 45–70 (In Persian with English Summary).
- Gomaa, E. F. 2013. Effect of nitrogen, phosphorus and biofertilizers on quinoa plant. *Journal of Applied Sciences Research*, 9(8): 5210–5222.
- Gupta, G., Parihar, S. S., Ahirwar, N. K., Snehi, S. K., and Singh, V. 2015. Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): current and future prospects for development of sustainable agriculture. *Journal of Microbial & Biochemical Technology*, 7(2): 96–102.
- Jaikishun, S., Li, W., Yang, Z., and Song, S. 2019. Quinoa: In Perspective of Global Challenges. *Agronomy*, 9(4). doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy9040176>
- Jacobsen, S. E. 2017. The scope for adaptation of quinoa in Northern Latitudes of Europe. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 203(6): 603-613.
- Khanamani, A. , Tohidi-Nejad, E. , Khajoei-Nejad, G. and Ghanbari, J. 2023. Evaluation of Efficiency in Fenugreek-Black Cumin Intercropping Under Application of Growth-Promoting Bacteria and Nitrogen Fertilizer Amounts. *Journal of Crops Improvement*, 25(1): 159–175 (In Persian with English Summary).
- Kizilkaya, R. 2009. Nitrogen fixation capacity of *Azotobacter* spp. strains isolated from soils in different ecosystems and relationship between them and the microbiological properties of soils. *Journal of Environmental Biology*, 30(1): 73–82.
- Kraiser, T., Gras, D. E., Gutiérrez, A. G., Gonzalez, B., and Gutiérrez, R. A. 2011.

- A holistic view of nitrogen acquisition in plants. *Journal of Experimental Botany*, 62(4): 1455–1466.
- Lavini, A., Pulvento, C., d’Andria, R., Riccardi, M., Choukr-Allah, R., Belhabib, O., ... Qadir, M. 2014. Quinoa’s potential in the Mediterranean region. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 200(5): 344–360.
- Lescourret, F., Magda, D., Richard, G., Adam-Blondon, A.-F., Bardy, M., Baudry, J., ... Soussana, J.-F. 2015. A social–ecological approach to managing multiple agro-ecosystem services. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 14: 68–75. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2015.04.001>
- Mousa, A. M., Ibrahim, R. M., and Galal, Y. G. 2022. Contribution of organic compost and bacterial inoculation in improving quality of quinoa seeds. *Al-Azhar Bulletin of Science*, 33(1–C): 133–142.
- Najafinezhad, H. , Koohi, N., and Darvishi, D. 2022. Evaluation of grain yield and quality of quinoa cultivars as affected by planting date and plant density in Jupar region of kerman. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 53(1): 113-129. doi: 10.22059/ijfcs.2021.311672.654761
- Nosheen, A., Bano, A., Naz, R., Yasmin, H., Hussain, I., Ullah, F., ... Tahir, A. T. 2019. Nutritional value of *Sesamum indicum* L. was improved by *Azospirillum* and *Azotobacter* under low input of NP fertilizers. *BMC Plant Biology*, 19(1): 466. doi: <https://doi.org/10.1186/s12870-019-2077-3>
- Paradkar, M., Singh, A., Dwivedi, B., Singhai, N., and Khare, Y. R. 2022. Response of NPK levels and biofertilizers on growth, yield and quality of quinoa (*Chenopodium quinoa*). *Pharma Innovation*, 11(11): 642–645.
- Paungfoo-Lonhienne, C., Redding, M., Pratt, C., and Wang, W. 2019. Plant growth promoting rhizobacteria increase the efficiency of fertilisers while reducing nitrogen loss. *Journal of Environmental Management*, 233: 337–341. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.052>
- Romero-Perdomo, F., Abril, J., Camelo, M., Moreno-Galván, A., Pastrana, I., Rojas-Tapias, D. F., and Bonilla, R. 2017. *Azotobacter chroococcum* as a potentially useful bacterial biofertilizer for cotton (*Gossypium hirsutum*): Effect in reducing N fertilization. *Revista Argentina de Microbiologia*, 49(4):

- 377–383. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ram.2017.04.006>
- Saha, B., Saha, S., Das, A., Bhattacharyya, P. K., Basak, N., Sinha, A. K., and Poddar, P. 2017. Biological nitrogen fixation for sustainable agriculture. *Agriculturally Important Microbes for Sustainable Agriculture: Volume 2: Applications in Crop Production and Protection*, 81–128.
- Schulte auf'm Erley, G., Kaul, H.-P., Kruse, M., and Aufhammer, W. 2005. Yield and nitrogen utilization efficiency of the pseudocereals amaranth, quinoa, and buckwheat under differing nitrogen fertilization. *European Journal of Agronomy*, 22(1): 95–100. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2003.11.002>
- Shams, A. S. 2011. Response of quinoa to nitrogen fertilizer rates under sandy soil conditions. In Proc. 13th International Conf. Agron., Fac. of Agric., Benha Univ., Egypt (pp. 9-10).
- Singh, D., Singh, S. K., Modi, A., Singh, P. K., Zhimo, V. Y., and Kumar, A. 2020. Impacts of agrochemicals on soil microbiology and food quality, in *Agrochemicals Detection, Treatment and Remediation* (Oxford: Butterworth Heinemann), 101–116.
- Vafa, Z. N., Sohrabi, Y., Sayyed, R. Z., Luh Suriani, N., and Datta, R. 2021. Effects of the combinations of rhizobacteria, mycorrhizae, and seaweed, and supplementary irrigation on growth and yield in wheat cultivars. *Plants*, 10(4): 811.
- Velmourougane, K., Prasanna, R., Chawla, G., Nain, L., Kumar, A., and Saxena, A. K. 2019. *Trichoderma–Azotobacter* biofilm inoculation improves soil nutrient availability and plant growth in wheat and cotton. *Journal of Basic Microbiology*, 59(6): 632–644.
- Wani, S. A., Chand, S., Wani, M. A., Ramzan, M., and Hakeem, K. R. 2016. *Azotobacter chroococcum* – A Potential Biofertilizer in Agriculture: An Overview. In: Hakeem, K., Akhtar, J., Sabir, M. (eds) *Soil Science: Agricultural and Environmental Prospectives*. Springer, Cham. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-34451-5_15
- Xu, G., Fan, X., and Miller, A. J. 2012. Plant nitrogen assimilation and use efficiency. *Annual Review of Plant Biology*, 63: 153–182. doi: <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-070711-143401>

org/10.1146/annurev-arplant-042811-105532

Zhang, X., Davidson, E. A., Mauzerall, D. L., Searchinger, T. D., Dumas, P., and Shen, Y. 2015. Managing nitrogen for sustainable development. *Nature*, 528(7580): 51–59. doi: <https://doi.org/10.1038/nature15743>

Agronomic efficiency of nitrogen and response of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) cultivars to inoculation with *Azotobacter* at varying nitrogen application levels

Zahra Alinejad Sarapardeh¹, Gholamreza Khajoei-Nejad^{2*}, Enayatollah Tohidi-Nejad³,
Jalal Ghanbari⁴

1. MSc Student in Crop Ecology, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, ShahidBahonar University of Kerman, Iran
2. Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, ShahidBahonar University of Kerman, Iran. (Corresponding author)
3. Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, ShahidBahonar University of Kerman, Iran
4. Seed and Plant Certification and Registration Institute (SPCRI), Agricultural Research, Education & Extension Organization (AREEO), Kerman, Iran

Received: June 2025 Accepted: May 2026- DOI: 10.22092/aj.2026.369734.1701

Extended Abstract

Alinejad Sarapardeh, Z., Khajoei-Nejad, Gh., Tohidi-Nejad, E., Ghanbari, J., Agronomic efficiency of nitrogen and response of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) cultivars to inoculation with *Azotobacter* at varying nitrogen application levels

Applied Research in Field Crops Vol 37, No.3, 2024, 8-10: 41-64(in Persian)

Extended Abstract

Providing adequate nitrogen to crops poses significant challenges due to the element's high mobility in soil. In this context, utilizing biological nitrogen fixation (BNF) can significantly enhance nitrogen productivity (Aasfar et al., 2021). The application of plant growth-promoting bacteria (PGPB) is recognized as a sustainable agronomic strategy to improve nitrogen uptake and optimize fertilizer use efficiency, thereby enhancing overall plant nutrition (Consentino et al., 2022). Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.), valued for its extensive genetic diversity, climatic adaptability, and high water-use efficiency, represents an ideal crop for cultivation in water-limited conditions and saline soils (Lavini et al., 2014). The objective of this research was to assess the response of two quinoa cultivars, Titicaca and Redcarina, to inoculation with *Azotobacter chroococcum* under varying nitrogen application levels and to analyze the agronomic efficiency of nitrogen fertilization.

Materials & Methods:

This study was conducted during the 2023-2024 growing season at the Shahid Bahonar University Research Farm, Kerman, Iran. The experiment was arranged in a split-factorial design based on a randomized complete block design (RCBD) with three replications. The main plot factor was nitrogen fertilizer application, consisting of three levels: control (no chemical fertilizer), 50% of the plant's recommended nitrogen requirement, and 100% of the recommended requirement. Additionally, seed inoculation with *Azotobacter chroococcum* (non-inoculated control vs. inoculated) and the two quinoa cultivars were investigated as factorial treatments in subplots. At maturity, various traits were measured, including plant height, number of panicles per plant, seed per panicle, total seeds per plant, thousand-seed weight, grain yield per m², bacterial inoculation efficiency (BIE), agronomic efficiency of nitrogen fertilization (AEN), and total nitrogen use efficiency (NUE).

Results & Discussion:

The results indicated that the Redcarina cultivar exhibited greater plant height and a higher number of panicles per plant compared to Titicaca. The maximum number of seeds per plant was achieved through bacterial inoculation at the 100% fertilization level, which did not differ significantly from the 50% fertilization treatment. Redcarina produced 34% and 33% more seeds per plant than Titicaca under the control (0% N) and 50% N conditions, respectively. Conversely, Titicaca outperformed Redcarina in thousand-seed weight, surpassing it by 21% and 22% under the control and 50% N conditions, respectively. Inoculation with *Azotobacter* increased grain yield and NUE by 15% compared to non-inoculated plants. Additionally, the 100% fertilization treatment led to a 29.3% increase in grain yield and a 25.7% increase in NUE compared to the control; however, no significant difference was observed between the 100% and 50% fertilization levels. The investigation of agronomic efficiency of nitrogen (AEN) revealed distinct cultivar-specific responses to bacterial inoculation. Notably, both cultivars achieved the highest AEN at a 50% fertilization rate when bacterial inoculation was applied. Notably, for Redcarina, increase in nitrogen application to 100%

enhanced AEN compared to non-inoculation, suggesting a superior response to high N availability. Additionally, the findings regarding the bacterial inoculation effect (BIE) indicated that BIE in Redcarina was improved with higher levels of nitrogen application. Conversely, Titicaca reached its maximum efficiency at the 50% nitrogen level, indicating optimal performance under moderate nitrogen supply; consequently, bacterial inoculation efficiency in Titicaca declined as fertilization levels increased.

Conclusion:

Redcarina demonstrates a superior response to nitrogen availability, as increasing the fertilizer level to 100% enhances its agronomic nitrogen use efficiency. Conversely, Titicaca displays optimal agronomic efficiency under limited-nitrogen conditions, with no additional benefits observed at the 100% fertilization level. These findings suggest that selecting appropriate quinoa cultivars is a critical strategy for optimizing yield based on the fertility status of agricultural land.

Keywords: Bacterial inoculation effect, Chemical fertilizer, Growth promoting bacteria, Nitrogen use efficiency, Redcarina, Titicaca.

References

- Aasfar, A., Bargaz, A., Yaakoubi, K., Hilali, A., Bennis, I., Zeroual, Y., & Meftah Kadmiri, I. 2021. Nitrogen Fixing Azotobacter Species as Potential Soil Biological Enhancers for Crop Nutrition and Yield Stability. *Frontiers in Microbiology*, 12: 354. doi: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.628379>
- Consentino, B. B., Aprile, S., Roupheal, Y., Ntatsi, G., De Pasquale, C., Iapichino, G., ... Sabatino, L. 2022. Application of PGPB Combined with Variable N Doses Affects Growth, Yield-Related Traits, N-Fertilizer Efficiency and Nutritional Status of Lettuce Grown under Controlled Condition. *Agronomy*, 12(2): 236. doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy12020236>.

Lavini, A., Pulvento, C., d'Andria, R., Riccardi, M., Choukr-Allah, R., Belhabib, O., ... Qadir, M. 2014. Quinoa's potential in the Mediterranean region. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 200(5): 344–360.