

مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی سطوح آبیاری و نیتروژن بر عملکرد، کارایی مصرف آب و کارایی مصرف نیتروژن

در گیاه کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd.) با استفاده از مدل‌سازی سطح - پاسخ

پرویز رضوانی مقدم^{1*}، سرور خرم‌دل²، هدا لطیفی³، محمودرضا فرزانه بلگردی⁴، سید جلیل داورپناه⁵

تاریخ دریافت: 1399/10/30

تاریخ پذیرش: 1400/02/22

چکیده

بهینه‌سازی یکی از راهکارهای مؤثر مدیریتی برای بهبود کارایی مصرف منابع و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی محسوب می‌شود. مدل سطح-پاسخ (RSM) مجموعه‌ای از تکنیک‌های آماری و ریاضی مورد استفاده برای بهینه‌سازی نهاده‌های تولید به شمار می‌آید. در این مطالعه، بهینه‌سازی سطوح نیتروژن و آبیاری کینوا با استفاده از طرح مرکب مرکزی (CCD) انجام شد. این آزمایش با 13 تیمار و دو تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد در سال زراعی 97-1396 اجرا شد. تیمارها بر اساس سطح پایین و بالای آبیاری (به ترتیب با 2500 و 7500 مترمکعب در هکتار) و نیتروژن (به ترتیب با صفر و 200 کیلوگرم نیتروژن در هکتار) تعیین شدند. عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، شاخص‌های کارایی نیتروژن و کارایی مصرف آب به‌عنوان متغیر وابسته مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند و تغییرات این متغیرها با استفاده از مدل رگرسیونی ارزیابی شد. به منظور ارزیابی کیفیت مدل پیش‌بینی شده از آزمون عدم برازش استفاده شد. مقادیر بهینه کاربرد نیتروژن و آب برای مقادیر مطلوب متغیرهای وابسته شامل عملکرد دانه، بازیافت نیتروژن، کارایی مصرف نیتروژن و کارایی مصرف آب در سه سناریوی اقتصادی، زیست‌محیطی و اقتصادی-زیست‌محیطی بررسی شد. نتایج نشان داد که اثر جزء خطی و درجه دو بر تمام صفات مورد مطالعه معنی‌دار بود. اثر متقابل دو عامل نیتروژن و آبیاری تنها بر کارایی مصرف نیتروژن و کارایی مصرف آب معنی‌دار بود. آزمون عدم برازش در مورد هیچ‌کدام از صفات معنی‌دار نشد که این امر نشان‌دهنده‌ی برازش مطلوب مدل رگرسیون درجه دو کامل بود. بیشترین عملکرد دانه با 3835/4 کیلوگرم در هکتار برای مصرف 200 کیلوگرم نیتروژن و 7500 مترمکعب در هکتار آبیاری به‌دست آمد. در سناریوی اقتصادی-زیست‌محیطی کاربرد 90 کیلوگرم نیتروژن در هکتار و 6000 مترمکعب در هکتار آبیاری موجب حصول کارایی مصرف نیتروژن با 15/93 کیلوگرم دانه بر کیلوگرم نیتروژن خاک، بازیافت نیتروژن 50 درصد، کارایی مصرف آب 0/5 کیلوگرم در مترمکعب و 3121 کیلوگرم در هکتار عملکرد دانه شد. به‌طور کلی، به نظر می‌رسد میزان مصرف منابع به‌ویژه آب و نیتروژن بر اساس سناریوی اقتصادی-زیست‌محیطی می‌تواند به‌عنوان راهکاری مطلوب در توسعه سطح زیر کشت و تولید پایدار کینوا به‌عنوان گیاهی جدید مد نظر قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: آزمون عدم برازش، سناریوی اقتصادی-زیست‌محیطی، طرح مرکب مرکزی، کارایی مصرف منابع، گیاه جدید

مقدمه

کینوا⁶ (*Chenopodium quinoa* Willd.) یکی از گیاهان جدید

است که از سوی سازمان خواروبار جهانی⁷ به‌عنوان گیاهی استراتژیک برای امنیت غذایی دنیا معرفی شده است. کینوا گیاهی دولپه با حدود 95 درصد خود گشتنی از کوه‌های آند کرانه غربی آمریکای جنوبی منشأ گرفته است (Jacobsen, 1998). این گیاه یکساله با ارتفاع یک تا دو متر است که علاوه بر دانه‌ها از برگ‌های جوان آن نیز به‌عنوان سبزی تازه یا به‌صورت پخته استفاده می‌شود. گیاه کینوا تحمل مناسبی در برابر دامنه گسترده‌ای از تنش‌های غیرزنده مانند سرما، شوری و خشکی دارد که به دلیل کیفیت بالای دانه و تحمل زیاد به شرایط سخت محیطی در مناطق زیادی از جهان کشت می‌شود (Sepahvand et al., 2010). دانه آن 12 تا 22 درصد پروتئین دارد و سرشار از اسیدهای آمینه ضروری مانند لایسین، متیونین و سیستئین است که در بیشتر غلات به میزان خیلی کم وجود دارد

- 1- استاد گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
 - 2- دانشیار گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
 - 3- دانشجوی دکتری بوم‌شناسی زراعی، گروه آگروتکنولوژی، دانشگاه فردوسی مشهد
 - 4- کارشناس ارشد هواشناسی کشاورزی، معاونت خدمات بیمه‌ای بانک کشاورزی استان خراسان رضوی
 - 5- دانشجوی دکتری بوم‌شناسی زراعی، گروه آگروتکنولوژی، دانشگاه فردوسی مشهد
- (*) نویسنده مسئول: (Email: rezvani@um.ac.ir)

DOI: 10.22067/jcesc.2021.68436.1013

6- Quinoa

7- Food and Agriculture Organization

رشد رویشی + گلدهی حاصل شد.

مصرف متعادل نیتروژن برای کشاورزی پایدار و حفظ محیط‌زیست ضروری است (Khajavi-Shojaei *et al.*, 2019). کینوا به محتوی نیتروژن خاک بسیار حساس بوده و کود نیتروژن برای رشد این محصول در طول دوره رشد رویشی مهم است (Erley *et al.*, 2005). بسرا و همکاران (Basra *et al.*, 2014) مصرف 75 کیلوگرم نیتروژن در هکتار بهترین مقدار کود نیتروژن برای رشد و نمو به کینوا و دستیابی به حداکثر عملکرد اقتصادی در شرایط زیست‌محیطی پاکستان را گزارش نمودند. همچنین ارلی و همکاران (Erley *et al.*, 2005) گزارش دادند که کینوا به شدت به کود نیتروژن پاسخ نشان می‌دهد و کاربرد 120 کیلوگرم نیتروژن بر هکتار در خاک لومی عملکرد بیشتر از 350 کیلوگرم در هکتار را نشان داده و عملکرد دانه نسبت به شاهد 94 درصد افزایش داشته است، همچنین با افزایش کاربرد سطح کود نیتروژن از 80 به 120 کیلوگرم نیتروژن در هکتار به‌طور متوسط به 12 درصد افزایش در عملکرد کینوا دست یافته‌اند.

بهبود کارایی سامانه‌ها و افزایش کارایی فرآیندها بدون افزایش هزینه دارای اهمیت بسیاری می‌باشد. روش مورد استفاده بدین منظور، بهینه‌سازی¹ نامیده می‌شود. روش سطح- پاسخ (RSM)² که برای نخستین بار توسط باکس و ویلسون (Box and Wilson, 1951) معرفی شد، مجموعه‌ای از روش‌های آماری و ریاضی است که در مورد فرآیندهایی کاربرد دارد که چندمتغیره هستند و یا میان متغیرها برهمکنش وجود داشته و پاسخ غیرخطی است (Dean and Montgomery, 2002; Voss, 2002; Myers and Montgomery, 2002). به‌منظور دستیابی به عملکرد قابل قبول و کاهش هم‌زمان آلودگی‌های زیست‌محیطی، نهاده‌های مورد استفاده در مزرعه باید با توجه به عملکرد مورد انتظار به‌صورت بهینه مصرف شوند. یکی از روش‌های آماری برای حصول مقادیر بهینه نهاده‌ها، استفاده از روش سطح- پاسخ می‌باشد (Aslan, 2007; Kwak, 2005).

روش سطح- پاسخ به منظور تعیین ترکیبی از تیمارها، یک مدل آماری با بهترین برازش بر اساس داده‌های مشاهده شده از نتایج طرح آزمایشی را ایجاد و مقادیر بهینه متغیرهای مستقل برای حصول مقدار مورد انتظار برای متغیر وابسته را تعیین می‌کند (Montgomery, 2009; Kalavathy *et al.*, 2001). از جمله مزایای دیگر استفاده از روش سطح- پاسخ می‌توان به بررسی اثرات متقابل مؤثر بر متغیر وابسته و همچنین ترکیب تیمارهای مختلف به‌صورت هم‌زمان با تعداد آزمایش‌های محدود اشاره کرد (Kalavathy *et al.*, 2009).

(Matiasевич *et al.*, 2006). علاوه بر ارزش پروتئینی دانه‌های این گیاه در مقایسه با سایر غلات عدم وجود گلوتن در دانه باعث شده که از دانه کینوا جهت تولید فرآورده‌های بدون گلوتن برای افرادی که به این ماده حساسیت دارند استفاده شود و این دانه به‌عنوان یک شبه‌غله شناخته شده است (Arbab Soleimani and Ezzati, 2015). ارزش غذای بسیار بالای دانه این گیاه موجب مقایسه آن توسط سازمان خواروبار جهانی با شیر خشک شد؛ به طوری که محصول اصلی این گیاه دانه آن و دارای ارزش غذایی بالایی است. محصول کینوا تحت عناوین خاویار گیاهی یا برنج اینکا نیز نام‌گذاری شده است. کینوا بسیار خوش هضم بوده و منبع غنی آهن، پروتئین، منیزیم، فیبر، فسفر و ویتامین B₂ و سرشار از ویتامین E و روغن امگا 6 می‌باشد (Lilian, 2009).

خشکی یک چالش جهانی و از جمله مهم‌ترین تنش‌های محیطی است که تولید گیاهان زراعی را در دنیا تحت تأثیر قرار داده و باعث کاهش عملکرد محصولات زراعی می‌شود (Manivannan *et al.*, 2006; Shao *et al.*, 2007). با در نظر گرفتن نقش فعالیت‌های کشاورزی در دشت‌های کم‌آب کشور و تأثیری که کمبود آب بر آن‌ها دارد می‌توان دریافت که بهترین و پایدارترین راهکار برای تداوم و پایداری فعالیت‌های کشاورزی در آینده استفاده علمی از آب و به‌کارگیری راهکارهایی برای بهینه‌سازی مصرف این نهاد است (Hosseinizad *et al.*, 2012). تنش خشکی موجب تحت تأثیر قرار گرفتن خصوصیات مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهان می‌شود (Heidari *et al.*, 2014). نتایج تحقیقی درخصوص اثر کم‌آب‌باری بر روی گیاه کینوا در کشور برزیل نشان داد که کم‌آب‌باری به میزان 50 درصد منجر به کاهش ارتفاع بوته، وزن خشک ساقه، برگ، سنبله و وزن هزار دانه شد (Jayme-Oliveira *et al.*, 2017). جمالی (Jamali, 2016) در تحقیقی بر روی گیاه کینوا رقم تی‌تی‌کا نشان داد که کم‌آب‌باری منجر به کاهش وزن هزار دانه، ارتفاع بوته، وزن خشک اندام‌های هوایی، ریشه و عملکرد دانه در بوته شد. همچنین با توجه به شرایط محدودیت آب در منطقه و با توجه به عدم وجود تفاوت معنی‌دار بین تیمارهای 100 درصد و 75 درصد نیاز آبی گیاه در صفت عملکرد دانه، نتیجه گرفته شد که این گیاه را با این میزان آب در منطقه گرگان تولید نمود. نتایج مطالعات رزاقی و همکاران (Razzaghi *et al.*, 2020) بر روی گیاه کینوا در ایران نشان داد که تأثیر کم‌آب‌باری بر صفاتی همچون عملکرد دانه، بهره‌وری آب به میزان آب آبیاری و مرحله رشدی که کم‌آب‌باری در آن اعمال می‌شود بستگی دارد. یکی از حساس‌ترین مراحل رشدی به کم‌آبی، گلدهی است که در صورت تنش آبی در این مرحله، عملکرد دانه کاهش یافته که این کاهش با انجام آبیاری در مرحله پر شدن دانه نیز جبران نمی‌گردد. این محققان اعلام نمودند که کمترین میزان عملکرد دانه در تیمارهای کم‌آب‌باری در کلیه مراحل رشد و مراحل

1- Optimization

2- Response-Surface Methodology

نیتروژن، آبیاری بهینه کینوا و اثر متقابل این عوامل جهت حصول بالاترین میزان عملکرد دانه و بهبود شاخص‌های کارایی نیتروژن و آب با استفاده از طرح مرکب مرکزی در شرایط آب و هوایی مشهد بود.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال زراعی 97-1396 در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد واقع در 10 کیلومتری شرق مشهد با طول جغرافیایی 59 درجه و 28 دقیقه و عرض جغرافیایی 36 درجه و 15 دقیقه و ارتفاع 985 متری از سطح دریا اجرا شد. تعداد تیمارهای طراحی شده در طرح مرکب مرکزی با استفاده از رابطه (1) محاسبه شد.

$$t = 2^k + 2k + r \quad (1)$$

در این فرمول، k: نشان‌دهنده تعداد فاکتور و r: تعداد تکرار تیمار در سطح میانگین می‌باشد (Box and Hunter, 1957; Aslan, 2007). بر این اساس، ترکیب تیمارهای آزمایشی با توجه به سطوح بالا و پایین آب (2500 و 7500 متر مکعب) و سطوح بالا و پایین نیتروژن (0 و 200 کیلوگرم نیتروژن در هکتار) برای کینوا توسط نرم‌افزار Minitab ver.17 تعیین شد. بر این اساس، 13 ترکیب تیماری (جدول 1) با دو تکرار برای این آزمایش در نظر گرفته شد.

در مرحله آماده‌سازی زمین و پیش از کاشت، نمونه‌ای مرکب از عمق 0-30 سانتی‌متری خاک به صورت تصادفی تهیه و جهت تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی به آزمایشگاه ارسال شد. نتایج آزمون خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول 2 ارائه شده است.

بذر مورد استفاده (بذر تی‌تی‌کا) جهت کاشت قبل از شروع آزمایش از شرکت کشت و صنعت انابد واقع در شهرستان بردسکن تهیه شد. پس از آماده‌سازی زمین، عملیات کاشت دستی در اول مرداد ماه 1397 در عمق 3-2 سانتی‌متری انجام شد. کود نیتروژن مصرفی (به صورت کود اوره با 46 درصد نیتروژن) برای هر کرت و بر اساس جدول 1 به سه قسمت مساوی تقسیم شد که یک سوم آن در زمان کاشت اعمال شد. بخش دوم کود نیتروژن یک ماه پس از کاشت (در مرحله استقرار) و بخش سوم، دو ماه پس از کاشت (در مرحله گلدهی) توزیع شد.

اولین آبیاری بلافاصله بعد از کاشت و آبیاری‌های بعدی تا پایان رشد محصول، به شیوه نشتی و با استفاده از سیفون بر اساس تیمار مربوطه انجام شد. به منظور جلوگیری از اختلاط اثر تیمارهای کودی، انتهای کرت‌ها مسدود و به منظور اعمال تیمارهای آبیاری، میزان آبیاری موردنیاز در هر دور آبیاری محاسبه شد و جهت آبیاری یکنواخت در هر گروه از تیمارها از پمپ و کنتور آب استفاده شد. وجین علف‌های هرز از هفته سوم و به صورت مستمر و تا بسته شدن کانوپی گیاهان، به صورت دستی انجام شد. پس از حذف حاشیه‌های

مرکب مرکزی (CCD)¹ یکی از انواع طرح‌های آماری برای مدل‌سازی سطح - پاسخ می‌باشد که این طرح به‌عنوان جایگزینی مناسب برای آزمایش‌های فاکتوریل محسوب می‌شود و امکان تعیین ترکیب‌های مختلف متغیرهای مستقل را در آزمایش فراهم می‌آورد (Aslan, 2007; Obeng et al., 2005). این روش توسط باکس و ویلسون (Box and Wilson, 1951) مطرح و توسط باکس و هانتز (Box and Hunter, 1957) تکمیل شد. طرح مرکب مرکزی به‌عنوان طرحی به‌منظور تعیین مقادیر متغیرهای مستقل برای توصیف تغییرات متغیر وابسته تعریف می‌شود. در این طرح میانگین سطوح فاکتورها به‌عنوان نقطه مرکزی در نظر گرفته می‌شود (Clarke and Kempson, 1997; Kalavathy et al., 2009).

کوچکی و همکاران (Koocheki et al., 2013) طی آزمایشی در قالب طرح مرکب مرکزی به منظور تعیین بهینه میزان مصرف آب (1500 و 4000 مترمکعب)، کود نیتروژن (صفر و 400 کیلوگرم کود اوره در هکتار) و تراکم (50 و 150 بوته در متر مربع) در کشت کلزا² گزارش نمودند که افزایش سطوح آبیاری و کود باعث افزایش عملکرد دانه و تشدید تلفات نیتروژن شد، در صورتی‌که افزایش تراکم باعث افزایش عملکرد شد و به دلیل افزایش جذب نیتروژن کاهش تلفات عملکرد را به دنبال داشت. به‌طور کلی، این محققان اظهار داشتند که مصرف منابع بر اساس سناریوی اقتصادی - زیست‌محیطی به دلیل توجه توأم به مسائل اقتصادی و زیست‌محیطی نسبت به دو سناریوی دیگر ارجحیت دارد. کوچکی و همکاران (Koocheki et al., 2019) طی مطالعه‌ای دیگر با برآورد مقادیر بهینه کود نیتروژن (صفر و 400 کیلوگرم کود اوره در هکتار) و آبیاری (2500 و 5000 مترمکعب) در زراعت گندم³ در قالب طرح مرکب مرکزی اظهار داشتند که افزایش مصرف کود نیتروژن و آبیاری اثر مثبتی بر افزایش عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک و کارایی مصرف آب داشت؛ لکن افزایش آبیاری منجر به کاهش کارایی مصرف نیتروژن و افزایش تلفات نیتروژن شد. لطیفی و همکاران (Latifi et al., 2018) طی آزمایشی در قالب طرح مرکب مرکزی به منظور تعیین بهینه کود نیتروژن (صفر و 100 کیلوگرم کود اوره در هکتار) و تراکم (10 و 40 بوته در متر مربع) در کشت کنبج⁴ گزارش نمودند که افزایش کوددهی باعث افزایش عملکرد دانه و کاهش کارایی جذب و کارایی مصرف نیتروژن شد همچنین اظهار نمودند که کاهش مصرف کود نیتروژن بعلت کاهش تلفات نیتروژن از آلودگی‌های زیست‌محیطی خواهد کاست. با توجه به آنچه گفته شد، هدف از اجرای این تحقیق تعیین میزان بهینه کود

1- Central Composite Design

2- Brassica napus

3- Triticum aestivum

4- Sesamum indicum

دانه‌های برداشت شده از هر کرت آزمایشی به‌طور جداگانه با ترازوی دقیق توزین و به این ترتیب، عملکرد دانه و بیولوژیک بر حسب کیلوگرم در هکتار محاسبه شد. میزان نیتروژن خاک در انتهای فصل رشد از عمق 0-30 سانتی‌متری خاک هر کرت اندازه‌گیری شد.

نیم‌متری کرت‌ها، به‌عنوان اثر حاشیه برداشت از یک متر مربع هر کرت در اوایل آبان‌ماه انجام شد. در هنگام برداشت، در سطح مذکور کلیه بوته‌ها از محل طوقه توسط داس جدا شد. پس از خشک شدن بوته‌ها دانه با استفاده از الک از کاه و کلش، کاملاً جدا و تمیز شد.

جدول 1- ضرایب و مقادیر تیمارها بر اساس طرح مرکب مرکزی

Table 1- Amounts and coefficients for treatments based on central composite design

مقادیر تیمارها Treatments	ضرایب Coefficients	Runs		
			نیتروژن Nitrogen rate (kg.ha ⁻¹)	آب Water rate (m ³ .ha ⁻¹)
0	2500	-1	-1	1
200	2500	+1	-1	2
0	7500	-1	+1	3
200	7500	+1	+1	4
0	5000	-1	0	5
200	5000	+1	0	6
100	2500	0	-1	7
100	7500	0	+1	8
100	5000	0	0	9
100	5000	0	0	10
100	5000	0	0	11
100	5000	0	0	12
100	5000	0	0	13

X₁ و X₂: به ترتیب نشان‌دهنده متغیرهای مستقل سطوح نیتروژن و آب هستند.

X₁ and X₂: indicate independent variables of nitrogen and water levels, respectively.

جدول 2- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

Table 2- Physical and chemical properties of soil

بافت Texture	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی EC (dS.m ⁻¹)	کربن آلی Organic carbon (%)	نیتروژن N (%)	فسفر P (mg.kg ⁻¹)	پتاسیم K (mg.kg ⁻¹)
لوم سیلتی Silty loam	7.92	0.58	0.62	0.058	29.2	186

جهت محاسبه کارایی مصرف نیتروژن (NUE)² از رابطه (3) استفاده شد (Hatermink et al., 2000).

$$NUE = \frac{Y_s}{N_{fertilizer} + N_{initial}} \quad (3)$$

که در این معادله، Y_s: عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)، N_{fertilizer}+N_{initial}: نیتروژن موجود در خاک در ابتدای فصل رشد (کیلوگرم نیتروژن در هکتار) + نیتروژن مصرفی از طریق کود اوره (کیلوگرم نیتروژن در هکتار) می‌باشد.

جهت محاسبه کارایی مصرف آب (WUE)³ از رابطه (4) استفاده شد (Rodrigues and Pereira, 2009).

$$WUE = \frac{Y_s}{Irrigation} \quad (4)$$

درصد بازیافت نیتروژن (NUpE)¹ بر اساس نسبت بین عملکرد نیتروژن در گیاه (کیلوگرم نیتروژن جذب شده در هکتار) بر کل مقدار نیتروژن در خاک (کیلوگرم در هکتار) محاسبه شد (رابطه 2) (Hatermink et al., 2000).

$$NUpE = \frac{Plant\ N\ content}{N_{fertilizer} + N_{initial}} \quad (2)$$

که در این معادله، plant N content: نیتروژن اندام‌های هوایی (کیلوگرم نیتروژن جذب شده در هکتار)، N_{fertilizer}+N_{initial}: نیتروژن موجود در خاک در ابتدای فصل رشد (کیلوگرم نیتروژن در هکتار) + نیتروژن مصرفی از طریق کود اوره (کیلوگرم نیتروژن در هکتار) می‌باشد.

2- Nitrogen use efficiency

3- Water use efficiency

1- Nitrogen recovery

نتایج نشان داد که اثر جزء خطی بر تمام صفات مورد مطالعه معنی‌دار ($p \leq 0/01$) بود. اثر جزء درجه دو کامل تمام صفات را به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر قرار داد ($p \leq 0/01$). اثر متقابل دو عامل نیتروژن و آب تنها بر کارایی مصرف آب و کارایی مصرف نیتروژن معنی‌دار ($p \leq 0/01$) بود. آزمون عدم برازش در مورد هیچ‌کدام از صفات معنی‌دار نشد که این امر نشان‌دهنده برازش مطلوب مدل رگرسیون درجه دو کامل می‌باشد. مقدار پایین RMSE نشان‌دهنده برازش عالی مدل در تمام صفات به‌جز کارایی مصرف نیتروژن می‌باشد و بر اساس مقدار RMSE، برازش مدل برای این صفت، متوسط است (جدول 3).

ضرایب رگرسیون برای مدل‌های برازش شده در مورد هر یک از صفات مورد مطالعه آزمایش در جدول 4 ذکر شده‌است.

ضرایب تبیین (R^2) نشان‌دهنده درصد تغییرات هر کدام از متغیرهای وابسته به‌وسیله متغیر مستقل بوده و ضرایب تبیین بالا در این معادلات نشان‌دهنده برازش خوب مدل محاسباتی است (جدول 4). بر این اساس مدل درجه دو کامل 55/19-83/4 درصد از تغییرات عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک و 94/5-85/29 درصد از تغییرات شاخص‌های بازیافت نیتروژن، کارایی مصرف نیتروژن و کارایی مصرف آب را نشان می‌دهد (جدول 4).

مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده شده عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، کارایی بازیافت نیتروژن، کارایی مصرف نیتروژن و کارایی مصرف آب کینوا در جدول 5 نشان داده شده‌است.

عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک: نتایج نشان داد که بیشترین عملکرد دانه مشاهده شده و پیش‌بینی شده به‌ترتیب با 3835/4 و 3860/6 کیلوگرم در هکتار به‌ترتیب برای مصرف 200 کیلوگرم نیتروژن در هکتار + 7500 مترمکعب آبیاری و 200 کیلوگرم نیتروژن در هکتار + 5000 مترمکعب آبیاری به‌دست آمد و کمترین عملکرد دانه مشاهده شده و پیش‌بینی شده به‌ترتیب با 2009/5 و 2051/75 کیلوگرم در هکتار برای عدم مصرف نیتروژن + 2500 مترمکعب آبیاری به‌دست آمد. همچنین بیشترین عملکرد بیولوژیک مشاهده شده و پیش‌بینی شده به‌ترتیب با 9425 و 9013 کیلوگرم در هکتار برای کاربرد 200 کیلوگرم نیتروژن + 5000 مترمکعب در هکتار آبیاری به‌دست آمد (جدول 5).

نتایج سطح - پاسخ اثر سطوح آبیاری و نیتروژن بر عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک نشان داد که با افزایش مصرف نیتروژن و آبیاری، شاخص‌های عملکرد کینوا افزایش یافت که البته در خصوص استفاده از نیتروژن، با افزایش میزان نیتروژن بیش از 100 کیلوگرم در هکتار عملکرد با شیب بیشتری افزایش یافت (شکل 1).

در این معادله، Irrigation: میزان آب مورد نیاز برای گیاه در طول دوره رشد است.

به‌منظور انتخاب مدل مناسب، مدل درجه دو کامل¹ با اثرات متقابل بین فاکتورها برازش داده شد (رابطه 5). سپس بر اساس معیارهای آماری تجزیه رگرسیون (مقادیر F ، P و R^2) و آزمون عدم برازش² بهترین مدل انتخاب و از این مدل برای بهینه‌سازی استفاده شد (Koocheki et al., 2019; Koocheki et al., 2013).

$$Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_1^2 + a_4x_2^2 + a_5x_1x_2 \quad (5)$$

در این معادله، Y : متغیر وابسته (که پاسخ به عملکرد دانه، بیولوژیک و سایر صفات تحت بررسی بودند)، x_1 : متغیر مستقل کود نیتروژن، x_2 : متغیر مستقل آبیاری و a_1 تا a_5 : ضرایب معادله می‌باشند. در نهایت، نتایج پیش‌بینی با داده‌های مشاهده شده مورد مقایسه قرار گرفتند و اعتبار مدل‌های رگرسیون با استفاده از جذر میانگین مربعات خط³ انجام شد (رابطه 6).

$$RMSE (\%) = \frac{100}{\bar{O}} * \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (6)$$

که در این معادله، \bar{O} : میانگین مشاهدات، P_i : مقادیر پیش‌بینی شده و O_i : مقادیر مشاهده شده می‌باشد.

RMSE به‌صورت درصد اختلاف نسبی مقادیر پیش‌بینی شده در برابر مقادیر واقعی بیان می‌شود و بر اساس تعریف، قدرت پیش‌بینی مدل در صورتی که RMSE کمتر از 10 درصد باشد، عالی، بین 10 تا 20 درصد، خوب، بین 20 تا 30 درصد، متوسط و بالاتر از 30 درصد، ضعیف برآورد می‌شود (Koocheki et al., 2019).

مقدار بهینه آبیاری و کود نیتروژن بر اساس سه سناریوی اقتصادی، زیست‌محیطی و اقتصادی - زیست‌محیطی محاسبه شد. بدین‌منظور، در سناریوی اقتصادی، عملکرد دانه، در سناریوی زیست‌محیطی، کارایی مصرف نیتروژن و آب و در سناریوی اقتصادی - زیست‌محیطی عملکرد دانه، کارایی مصرف نیتروژن و آب به‌عنوان عوامل اصلی تعیین‌کننده مقدار بهینه آبیاری و کود نیتروژن مورد استفاده قرار گرفتند.

جهت تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها و رسم نمودارها از نرم‌افزار Minitab ver.17 و MS Excel استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس مدل رگرسیونی درجه دو کامل برای هر کدام از متغیرهای وابسته شامل عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، کارایی بازیافت نیتروژن، کارایی مصرف نیتروژن و کارایی مصرف آب تحت تأثیر میزان آبیاری و نیتروژن در جدول 3 ارائه شده‌است.

- 1- Full quadratic regression
- 2- Lack of-fit
- 3- RMSE: Root mean square error

جدول 3- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) مدل رگرسیونی درجه دو کامل
Table 3- Variance analysis (mean of squares) of the full quadratic regression model

منابع تغییر S.O.V.	درجه آزادی d.f	عملکرد دانه Seed yield	عملکرد بیولوژیک Biological yield	کارایی مصرف آب Water use efficiency	کارایی مصرف نیتروژن Nitrogen use efficiency	کارایی بازیافت نیتروژن Nitrogen uptake efficiency
مدل: Model:	6	1055000**	5829235**	0.188852**	102.664**	1349.15**
تکرار Replication	1	158559 ^{ns}	4 ^{ns}	0.009438 ^{ns}	1.541 ^{ns}	0 ^{ns}
خطی Linear	2	2386323**	11690521**	0.502912**	246.816**	3060.57**
آب Water	1	2384852**	13020833**	0.852750**	72.237**	535.13**
نیتروژن Nitrogen	1	2387795**	10360208**	0.153074**	421.395**	5586.00**
درجه 2 Square	2	699396**	5341558**	0.038657**	55.638**	882.07**
آب × آب Water × Water	1	1017817**	5897545**	0.001085 ^{ns}	34.815**	395.99**
نیتروژن × نیتروژن Nitrogen × Nitrogen	1	1217266**	8689384**	0.058917**	106.763**	1745.59**
اثر متقابل Interaction	1	0 ^{ns}	911250 ^{ns}	0.040538**	9.533**	209.63 ^{ns}
آب × نیتروژن Water × Nitrogen	1	0 ^{ns}	911250 ^{ns}	0.040538**	9.533**	209.63 ^{ns}
خطا Error	19	48098	950801	0.002602	1.567	53.63
عدم برازش Lack of-fit	11	60084 ^{ns}	1183777 ^{ns}	0.003574 ^{ns}	2.192 ^{ns}	24.48 ^{ns}
خطای خالص Pure error	8	31616	630460	0.001265	0.708	74.83
RMSE (%)	—	1.15	1.95	5.51	24.01	6.88
کل Total	25	—	—	—	—	—

ns، * و **: به ترتیب عدم معنی‌داری و معنی‌دار در سطوح احتمال 5 و 1 درصد
ns, * and **: represent non-significant and significant at 5 and 1% probability levels, respectively.

جدول 4- ضرایب رگرسیون و تبیین برای مدل درجه دو کامل: $Y=a_0+a_1x_1+a_2x_2+a_3x_1^2+a_4x_2^2+a_5x_1x_2$
Table 4- Regression coefficients and R² for full quadratic model: $Y=a_0+a_1x_1+a_2x_2+a_3x_1^2+a_4x_2^2+a_5x_1x_2$

	a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	R ² (%)
عملکرد دانه Seed yield	198	2.47	0.929	0.03464	-0.000075	0.000001	83.4
عملکرد بیولوژیک Biological yield	326	-9.5	2.187	0.1260	-0.000164	-0.00130	55.19
بازیافت نیتروژن Nitrogen uptake efficiency	27.7	-0.4689	0.01827	0.001778	-0.000001	-0.000020	85.29
کارایی مصرف نیتروژن Nitrogen use efficiency	7.78	-0.1254	0.005435	0.000440	-0.000000	0.000004	93.93
کارایی مصرف آب Water use efficiency	1.0409	0.000488	-0.000101	0.000010	0.000000	-0.000000	94.5

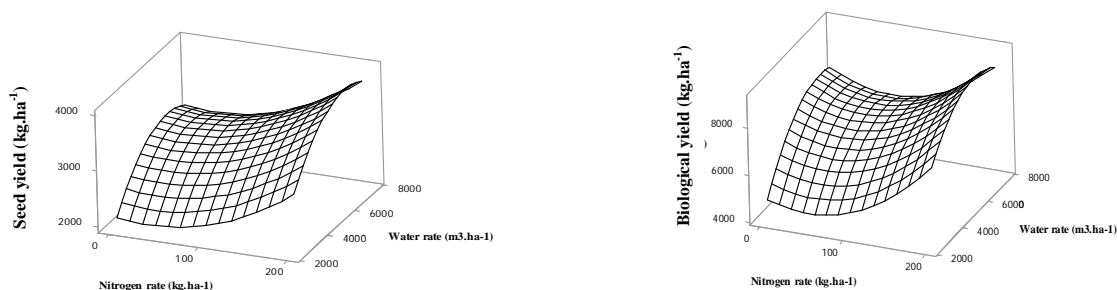
X₁ و X₂: به ترتیب نشان‌دهنده متغیرهای مستقل سطوح نیتروژن و آب هستند.
X₁ and X₂: indicate independent variables such as nitrogen and water levels, respectively.

جدول 5- مقادیر مشاهده شده و برآزش شده برای عملکرد و شاخص‌های کارایی نیتروژن و کارایی مصرف آب کینوا تحت تأثیر سطوح نیتروژن و آب
 Table 5- Observed and predicted values for yield and nitrogen efficiency indices and water use efficiency of quinoa affected as nitrogen and water levels

میزان نیتروژن Nitrogen rate (kg.ha ⁻¹)	میزان آب Water rate (m ³ .ha ⁻¹)	عملکرد دانه Seed yield (kg.ha ⁻¹)		عملکرد بیولوژیک Biological yield (kg.ha ⁻¹)		بازیافت نیتروژن Nitrogen uptake efficiency (percent)		کارایی مصرف نیتروژن Nitrogen use efficiency (kg N seed/kg N soil)		کارایی مصرف آب Water use efficiency (kg seed.m ⁻³ water)	
		مشاهده شده Observed	برآزش شده Predicted	مشاهده شده Observed	برآزش شده Predicted	مشاهده شده Observed	برآزش شده Predicted	مشاهده شده Observed	برآزش شده Predicted	مشاهده شده Observed	برآزش شده Predicted
0	2500	2009.50	2051.75	4500.00	4728.25	60.90	67.13	18.05	21.37	0.80	0.79
200	2500	3077.55	2943.85	7050.00	7269.25	32.29	34.47	9.88	11.89	1.23	1.29
0	7500	2766.80	2946.75	7250.00	7503.25	85.98	108.48	24.85	48.54	0.37	0.28
200	7500	3835.40	3839.85	8450.00	8694.25	36.90	55.82	12.32	35.06	0.51	0.78
0	5000	3187.50	2968.00	7600.00	7147.00	91.71	94.05	26.84	34.96	0.64	0.54
200	5000	3727.30	3860.60	9425.00	9013.00	39.95	51.39	11.97	23.48	0.75	1.03
100	2500	2061.70	2151.40	5175.00	4744.75	34.40	33.02	9.75	12.23	0.82	0.94
100	7500	3221.35	3046.90	7275.00	6844.75	44.78	64.37	15.24	37.40	0.38	0.43
100	5000	3214.85	3067.90	7325.00	6826.00	50.77	54.94	15.21	24.82	0.64	0.68
100	5000	3021.75	3067.90	5650.00	6826.00	39.14	54.94	14.30	24.82	0.60	0.68
100	5000	3012.60	3067.90	6900.00	6826.00	45.43	54.94	14.25	24.82	0.60	0.68
100	5000	2930.45	3067.90	6205.00	6826.00	42.47	54.94	13.86	24.82	0.59	0.68
100	5000	3068.75	3067.90	7100.00	6826.00	46.83	54.94	14.52	24.82	0.61	0.68

X₁ و X₂: به ترتیب نشان‌دهنده‌ی متغیرهای مستقل سطوح نیتروژن و آب هستند.

X₁ and X₂: indicate independent variables such as nitrogen and water levels, respectively



شکل 1- مدل سطح - پاسخ عملکرد دانه (الف) و عملکرد بیولوژیک (ب) کینوا تحت تأثیر سطوح نیتروژن و آبیاری
Figure 1- Response surface model for seed (A) and biological yield (B) of quinoa affected of nitrogen and water levels

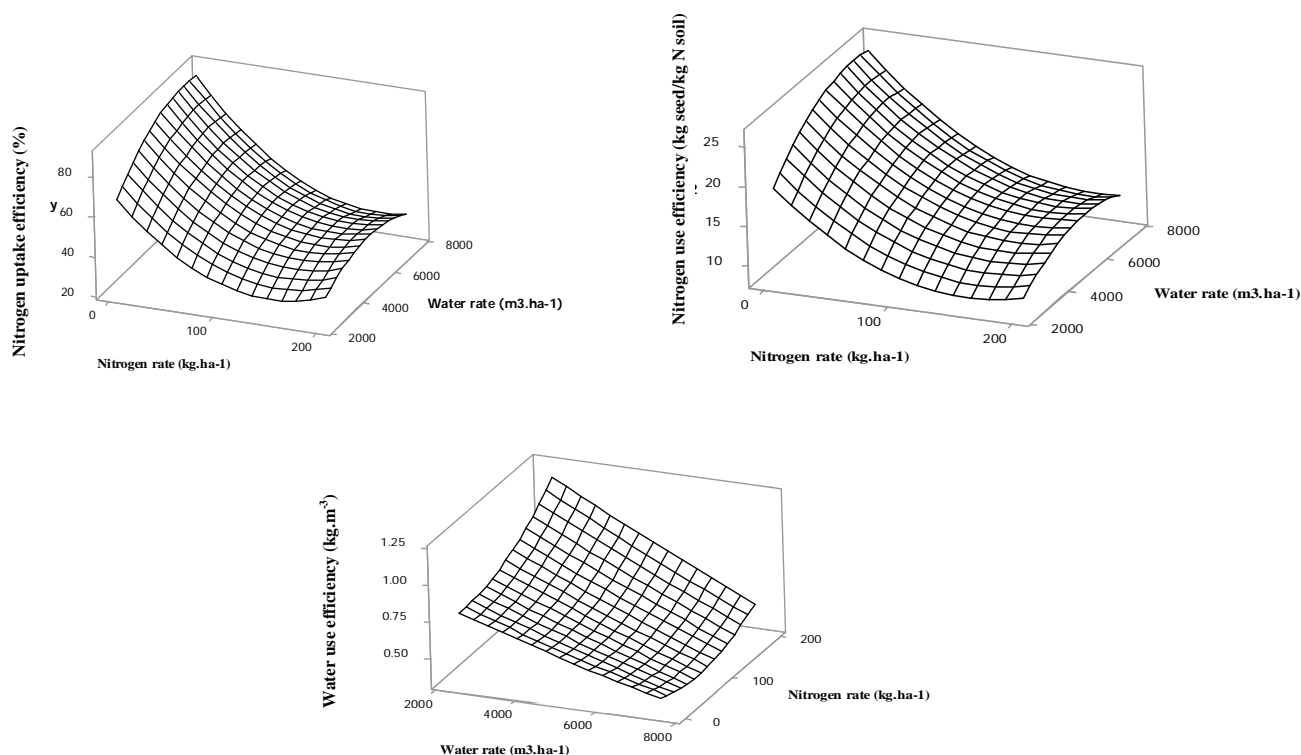
خشکی به میزان 50 و آبیاری کامل) بر رشد و عملکرد کینوا نشان داد که اثر تنش خشکی در مراحل مختلف رشد بر عملکرد و اجزای عملکرد (شامل ارتفاع، عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، شاخص برداشت و وزن هزار دانه) معنی‌دار شد. بیشترین میزان عملکرد دانه (4/334 تن در هکتار) مربوط به رقم تی‌تی‌کا با آبیاری کامل و کمترین میزان عملکرد (760 کیلوگرم در هکتار) مربوط به رقم گیزوان تحت تنش 50 درصد نیاز آبی مشاهده شد که علت این امر مربوط به آن است که گیاه در زمان پر شدن دانه وقتی با تنش خشکی روبه‌رو می‌شود، از طریق افت فتوسنتز، باعث کاهش عملکرد دانه در واحد سطح می‌شود. حال اگر خشکی در مرحله پر شدن دانه مخصوصاً اگر تحت شرایط افزایش دما همراه باشد، موجب تسریع در پیری برگ‌ها، کاهش طول دوره پر شدن دانه، کاهش میانگین وزن دانه‌ها و در نتیجه افت عملکرد می‌شود که این موارد به دلیل برگ‌ریزی شدید ناشی از تنش خشکی می‌باشد (Kazemi *et al.*, 2019).

بازیافت نیتروژن و کارایی مصرف نیتروژن: نتایج نشان داد بیشترین کارایی بازیافت نیتروژن پیش‌بینی شده و مشاهده شده به‌ترتیب با 108/48 و 91/71 درصد تحت تأثیر مصرف 7500 مترمکعب آب+ عدم مصرف نیتروژن و کمترین کارایی بازیافت نیتروژن پیش‌بینی شده و مشاهده شده به‌ترتیب با 33/02 و 32/29 درصد برای مصرف 2500 مترمکعب آب+ 100 کیلوگرم در هکتار و 2500 مترمکعب آب+ 200 کیلوگرم در هکتار حاصل شد. همچنین بیشترین کارایی مصرف نیتروژن پیش‌بینی شده و مشاهده شده به‌ترتیب با 48/54 و 26/84 کیلوگرم نیتروژن دانه به کیلوگرم نیتروژن خاک برای مصرف 7500 مترمکعب آب+ عدم مصرف نیتروژن و 5000 مترمکعب آب+ عدم مصرف نیتروژن به‌دست آمد و کمترین کارایی مصرف نیتروژن پیش‌بینی شده و مشاهده شده به‌ترتیب با 11/98 و 9/75 کیلوگرم نیتروژن دانه به کیلوگرم نیتروژن خاک برای مصرف

همچنین نتایج نشان داد که میزان نیتروژن و آب، عملکرد دانه و بیولوژیک را به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر قرار داد (جدول 3). همانطوری که انتظار می‌رود با افزایش سطوح تیمارها (نیتروژن و آب) عملکرد به‌واسطه تحریک رشد رویشی افزایش یافت. در همین راستا ارلی و همکاران (Erley *et al.*, 2005) گزارش دادند که کینوا به شدت نسبت به مصرف کود نیتروژن واکنش نشان می‌دهد. برتی و همکاران (Berti *et al.*, 2000) گزارش دادند که بیشترین عملکرد دانه کینوا گیاهی است که برای بالاترین میزان مصرف نیتروژن (225 کیلوگرم در هکتار) به‌دست آمد. گوما (Goma, 2013) گزارش کرد که کود نیتروژن باعث افزایش رشد رویشی و روند سوخت و ساز در کینوا و همچنین افزایش تجمع ماده خشک گیاه می‌شود. نتایج آزمایش در دانشگاه ازبیر ترکیه در خصوص اثر سطوح کود نیتروژن (صفر، 50، 75، 100، 125، 150، 175 و 200 کیلوگرم در هکتار) بر عملکرد دانه کینوا در شرایط آب و هوایی مدیترانه‌ای نشان داد که بهترین میزان نیتروژن برای تولید بیشترین عملکرد دانه (2/95 تن در هکتار) در شرایط استفاده از 150 کیلوگرم نیتروژن در هکتار به‌دست آمد (Geren, 2015). نتایج آزمایشی در پاکستان بر روی دو رقم کینوا نشان داد که بیشترین عملکرد تحت تأثیر مصرف 75 و 100 کیلوگرم در هکتار به‌دست آمد (Basra *et al.*, 2014). شمس (Shams, 2012) طی بررسی روی واکنش کینوا به سطوح مختلف کود نیتروژن (0، 90، 180، 270 و 360 کیلوگرم در هکتار) دریافت که با افزایش سطوح نیتروژن تا بالاترین سطح، عملکرد بیولوژیکی افزایش یافت و افزایش مقادیر نیتروژن نه تنها منجر به افزایش رشد محصول و تولید زیست‌توده کل شد، بلکه کیفیت دانه را نیز تحت تأثیر قرار داد. نتایج آزمایشی در مصر روی بررسی واکنش کینوا به سطوح مختلف آبیاری (100، 60 و 30 درصد ظرفیت زراعی) نشان داد که تنش آبی (30 درصد ظرفیت زراعی)، 74 درصد عملکرد دانه را نسبت به تیمار آبیاری کامل کاهش می‌دهد (Telahigue *et al.*, 2017)، همچنین نتایج آزمایشی شامل اثر تیمارهای آبیاری (تنش

افزایش مصرف نیتروژن، شاخص‌های بازیافت نیتروژن و کارایی مصرف نیتروژن کاهش و با افزایش آبیاری مقادیر این صفات افزایش یافت (شکل 1).

100 کیلوگرم نیتروژن + 2500 مترمکعب در هکتار آب و 200 کیلوگرم نیتروژن در هکتار + 2500 مترمکعب در هکتار آب حاصل شد (جدول 5). نتایج سطح - پاسخ اثر آبیاری و نیتروژن بر شاخص‌های مقادیر بازیافت نیتروژن و کارایی مصرف نیتروژن نشان داد که با



شکل 2- مدل سطح - پاسخ بازیافت نیتروژن (الف)، کارایی مصرف نیتروژن (ب) و کارایی مصرف آب (ج) کینوا تحت تأثیر سطوح نیتروژن و آبیاری
Figure 2- Response- surface model for nitrogen uptake efficiency (A) , nitrogen use efficiency (B) and water use efficiency (C) of quinoa affected of nitrogen and water levels

اساسی در افزایش کارایی مصرف نیتروژن شامل جذب نیتروژن از خاک تا قبل از گلدهی گیاه و همچنین جذب این عنصر متحرک در طی مراحل انتهایی رشد می‌باشند. همچنین ممکن است با افزایش مصرف کود، گیاه نتواند متناسب با این افزایش، از رشد زایشی مطلوبی برخوردار باشد. در خصوص افزایش شاخص‌های کارایی نیتروژن با افزایش آبیاری به نظر می‌رسد، میزان حلالیت نیتروژن تحت تأثیر آبیاری در نتیجه افزایش آبیاری افزایش یافته که بر روی جذب و مصرف آن تأثیر مثبتی دارد. نتایج آزمایشی در اهواز در خصوص اثر سطوح کود نیتروژن (صفر، 80، 160، 240، 320 کیلوگرم در هکتار) بر شاخص‌های کارایی نیتروژن در کینوا نشان داد که با مصرف نیتروژن، میزان این شاخص‌ها کاهش یافت،

کاهش شاخص‌های بازیافت نیتروژن و کارایی مصرف نیتروژن با افزایش مصرف نیتروژن دور از انتظار نیست؛ همین‌طور که در سایر مطالعات نیز اشاره شده و نتایج مشابه این مطالعه روی کاهش شاخص‌های کارایی مصرف منابع تحت تأثیر افزایش آن حاصل و تایید شده است. در همین راستا، کوچکی و همکاران (*Koocheki et al.*, 2018) گزارش کردند که در گیاه ذرت¹ با افزایش مصرف نیتروژن، شاخص بازیافت آن کاهش یافت و دلیل این امر به افزایش فراهمی نیتروژن نسبت داده شد. همچنین آیشویی، باعث افزایش تلفات و کاهش کارایی جذب و مصرف نیتروژن می‌گردد. به عقیده مونتلمورو و همکاران (*Montemuro et al.*, 2006) دو عامل

1- *Zea mays*

به طوری که بیشترین کارایی زراعی نیتروژن و کارایی فیزیولوژیک نیتروژن به ترتیب با $38/71$ و $113/4$ کیلوگرم بر کیلوگرم برای مصرف 80 کیلوگرم نیتروژن در هکتار به دست آمد. سایر بررسی‌ها نشان داده است که کاربرد مقدار بیشتر کود نیتروژن از طریق کاهش شاخص بازیافت نیتروژن به دلیل افزایش تلفات نیتروژن از طریق دنتریفیکاسیون، تبخیر آمونیومی، رواناب و آبشویی موجب کاهش کارایی مصرف این عنصر گردد (Eickhout *et al.*, 2006).

کارایی مصرف آب: نتایج نشان داد که بیشترین کارایی مصرف آب پیش‌بینی شده و مشاهده شده کینوا به ترتیب با $1/29$ و $1/23$ کیلوگرم دانه بر مترمکعب آب برای مصرف 200 کیلوگرم نیتروژن + 2500 مترمکعب بر هکتار آب به دست آمد و کمترین کارایی مصرف آب پیش‌بینی شده و مشاهده شده به ترتیب با $0/28$ و $0/37$ کیلوگرم دانه بر مترمکعب آب برای مصرف 7500 مترمکعب آبیاری + عدم مصرف نیتروژن حاصل شد (جدول 5). نتایج سطح - پاسخ اثر آبیاری و نیتروژن بر کارایی مصرف آب نشان داد که با افزایش آبیاری، کارایی مصرف آب کاهش و با افزایش میزان مصرف کود نیتروژن این صفت افزایش یافت (شکل 2). گیاه کینوا جهت مقابله با خشکی و افزایش راندمان مصرف آب روزه‌های برگ را بسته که خود موجب حفظ پتانسیل آب برگ و سرعت فتوسنتز در طول خشک شدن خاک می‌گردد، از طرفی در طول خشک شدن خاک، ریشه‌های گیاه آبسزیک اسید تولید کرده که باعث تنظیم فعالیت روزه‌ها از طریق کاهش آماس سلول‌های نگهبان روزه و هدایت روزه‌های می‌شود (Jacobsen *et al.*, 2009). نتایج مطالعه استیکج و همکاران (Stikic *et al.*, 2015) روی بررسی اثر خشکی بر رژیم‌های آبی و رشد گیاه کینوا نشان داد واکنش این گیاه به خشکی به صورت مکانیسم اجتناب از خشکی، براساس کاهش هدایت روزه‌های، کاهش سطح برگ، کاهش تعرق و افزایش جذب آب است. بنابراین این محققان گیاه کینوا را به عنوان یک محصول جدید مقاوم در برابر خشکسالی معرفی نمودند که توسعه کشت و کار آن به ویژه در مناطق خشک و کم‌آب می‌تواند ثبات تولید را در مناطق مختلف آب و هوایی دنیا به ویژه این مناطق تضمین نماید. بهره‌وری آب کشاورزی در کشور حدود $0/88$ کیلوگرم به ازای مصرف یک مترمکعب مصرف آب گزارش شده است که برای گندم، شلتوک، پنبه، ذرت، چغندر قند و نیشکر به ترتیب برابر $0/77$ ، $0/36$ ، $0/16$ ، $0/51$ ، $0/34$ و $0/31$ کیلوگرم به ازای مترمکعب آب محاسبه شده است (Keshavarz and Dehghani, 2012). در پژوهشی گلخانه‌ای روی بررسی اثر تنش آبی بر عملکرد کینوا گزارش شد که بیشترین بهره‌وری مصرف آب ($2/14$ کیلوگرم در مترمکعب) در تیمار تنش در کل دوره رشد مشاهده شد (Jamali *et al.*, 2019). یانگ و همکاران (Yang *et al.*, 2016) در پژوهشی روی مطالعه تحمل

گیاه کینوا نسبت به افزایش خشکی و درجه حرارت تحت سه تیمار آبیاری (آبیاری کامل، کمبود آبیاری و خشکی متناوب در منطقه ریشه) و دو رژیم حرارت ($18/8$ و $25/20$ درجه سانتی‌گراد) نشان دادند که ارتفاع بوته و وزن خشک ساقه تحت تاثیر تیمار خشکی متناوب در منطقه ریشه و کمبود آبیاری به‌طور قابل‌توجهی در مقایسه با تیمار آبیاری کامل کاهش یافت. همچنین گیاهان در تیمار خشکی متناوب در منطقه ریشه، ارتفاع بوته بلندتر و وزن خشک بالاتری در مقایسه با کمبود آبیاری به‌خصوص در درجه حرارت بالاتر داشتند. رشد گیاه در تیمار خشکی متناوب در منطقه ریشه با افزایش بهره‌وری آب، همراه بود. براین اساس، این محققان این گیاه را به دلیل نیاز آبی پایین، مقاومت به درجه حرارت‌های بالا و کارایی مصرف آب بالاتر بدلیل تحمل شرایط خشکی برای مناطق خشک و نیمه‌خشک معرفی نمودند.

بهبودسازی: مقادیر بهینه کاربرد نیتروژن و آب در زراعت کینوا برای حصول پاسخ عملکرد دانه، بازیافت نیتروژن و کارایی مصرف نیتروژن و کارایی مصرف آب تحت تاثیر سه سناریوی اقتصادی، زیست‌محیطی و اقتصادی - زیست‌محیطی در جدول 6 ارائه شده است.

مقدار شاخص مطلوبیت¹ بهینه‌سازی ($0 < DI \leq 1$) برای سه سناریوی اقتصادی، زیست‌محیطی و اقتصادی - زیست‌محیطی به ترتیب برابر $0/82$ ، $0/74$ و $0/93$ به دست آمد که نشان‌دهنده نتایج قابل‌قبولی برای سطوح پاسخ تحت تاثیر متغیرهای مستقل در هر سه سناریو می‌باشد. لازم به ذکر است هرچه این شاخص به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده دقت بالای مدل در شبیه‌سازی مقدار متغیرهای وابسته تحت تاثیر متغیرهای مستقل می‌باشد (Kalavathy *et al.*, 2009). در سناریوی اقتصادی عملکرد دانه به‌عنوان فاکتور اصلی تعیین‌کننده مقادیر بهینه منابع در نظر گرفته شد. بدین ترتیب نتایج نشان داد که با کاربرد حدود 170 کیلوگرم نیتروژن در هکتار و مقدار 7500 مترمکعب آبیاری در طول فصل رشد می‌توان به عملکرد دانه بالغ بر 3530 کیلوگرم در هکتار و کارایی مصرف نیتروژن $11/78$ کیلوگرم دانه بر کیلوگرم نیتروژن خاک، بازیافت نیتروژن 34 درصد و کارایی مصرف آب $0/43$ مترمکعب در هکتار دست پیدا کرد (جدول 6). در سناریوی زیست‌محیطی کارایی مصرف نیتروژن، بازیافت نیتروژن و کارایی مصرف آب به‌عنوان فاکتورهای بهینه‌سازی مد نظر قرار گرفتند. در واقع، در این سناریو کاهش هدر رفت آب، استفاده کمتر از کودهای شیمیایی که منجر به بروز آلودگی‌های زیست‌محیطی می‌گردد، مد نظر بوده و توجه کمتری به عملکرد اقتصادی شده است و در نهایت، در سناریوی اقتصادی - زیست‌محیطی به تمام عوامل توجه شده است که نتایج

آب 0/5 کیلوگرم دانه بر مترمکعب آب محاسبه شد که با کاربرد حدود 6000 متر مکعب در هکتار آبیاری و 90 کیلوگرم نیتروژن در هکتار میسر خواهد بود (جدول 6).

نشان می‌دهد که این سناریو بر سایر سناریوها ارجحیت دارد و هم‌زمان جنبه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی مورد توجه قرار گرفته است؛ به طوری که کارایی مصرف نیتروژن با 15/93 کیلوگرم دانه بر کیلوگرم نیتروژن خاک، بازیافت نیتروژن 50 درصد و کارایی مصرف

جدول 6- مقدار بهینه میزان نیتروژن و آب کینوا برای متغیرهای وابسته در سناریوهای اقتصادی، زیست‌محیطی و اقتصادی - زیست‌محیطی
Table 6- Optimizing of nitrogen and water levels of quinoa for dependent variables in economic, environmental and Economic-environmental scenarios

متغیر Variable	سناریوها Scenarios		
	اقتصادی Economic	زیست‌محیطی Environmental	اقتصادی - زیست‌محیطی Economic-environmental
عملکرد دانه Seed yield (kg.ha ⁻¹)	3522.84	2460.41	3120.76
کارایی مصرف آب Water use efficiency (kg seed/ m ³ water)	0.43	0.72	0.5
وابسته Dependent			
بازیافت نیتروژن Nitrogen recovery (percent)	34	65.03	50.04
کارایی مصرف نیتروژن Nitrogen use efficiency (kg N seed/kg N soil)	11.78	19.24	15.93
مستقل Independent			
میزان آب Water rate (m ³ .ha ⁻¹)	7500	3409.09	5909.48
میزان نیتروژن Nitrogen rate (kg.ha ⁻¹)	169.7	18.18	88.57
شاخص مطلوبیت Desirability index	0.82	0.74	0.93

پیش‌بینی شده به ترتیب با 3835/4 و 3860/6 کیلوگرم در هکتار به ترتیب برای مصرف 200 کیلوگرم نیتروژن در هکتار + 7500 مترمکعب آبیاری و 200 کیلوگرم نیتروژن در هکتار + 5000 مترمکعب آبیاری به دست آمد. بیشترین کارایی مصرف نیتروژن و بازیافت نیتروژن در شرایط عدم مصرف نیتروژن به دست آمد و این شاخص‌ها با افزایش میزان نیتروژن، کاهش یافتند که این امر یکی از دلایل مربوط به افزایش فراهمی نیتروژن تحت تاثیر تلفات نیتروژن از طریق آبشویی بوده و در نهایت، کاهش کارایی جذب و مصرف نیتروژن و تشدید بروز آلودگی‌های زیست‌محیطی را موجب می‌گردد. بیشترین کارایی مصرف آب پیش‌بینی شده و مشاهده شده کینوا به ترتیب با 1/29 و 1/23 کیلوگرم دانه بر مترمکعب آب برای مصرف 200 کیلوگرم نیتروژن + 2500 مترمکعب بر هکتار آب به دست آمد. توجه به اصول اولیه بهبود کارایی مصرف منابع و جلوگیری از هدر رفت نهاده‌های کشاورزی در راستای حفظ سطح مطلوب تولید، دستیابی به تولید پایدار محصولات زراعی است. در این مطالعه، سه سناریوی اقتصادی، زیست‌محیطی و اقتصادی - زیست‌محیطی بررسی شد که در مقایسه هر سه سناریوی ذکر شده، سناریوی اقتصادی -

در این سناریو علاوه بر این که عملکرد اقتصادی تفاوت زیادی با سناریوی اقتصادی ندارد (عملکرد دانه در سناریوی اقتصادی 12 درصد بیشتر از عملکرد سناریوی زیست‌محیطی - اقتصادی محاسبه شده است) آلودگی‌های زیست‌محیطی به واسطه استفاده کم‌تر از نهاده‌ها کاهش قابل توجهی داشته است. بر این اساس، با توجه به کمبود منابع آبی در راستای نیاز به افزایش تولید غذا به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که بخش نسبتاً زیادی از مساحت کره زمین را به خود اختصاص داده است، توصیه می‌شود کاشت گیاهان جدید مقاوم به کم‌آبی همچون کینوا بر اساس سناریوهای اقتصادی - زیست‌محیطی که توجه هم‌زمانی نسبت به مصرف منابع محیطی به ویژه آب و نیتروژن در راستای تولید عملکرد قابل قبول دارد، مدنظر قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که عملکرد دانه کینوا با افزایش میزان نیتروژن و آبیاری، افزایش می‌یابد و این گیاه به کودپذیری واکنش مثبت نشان می‌دهد، به طوری که بیشترین عملکرد دانه مشاهده شده و

بودجه این پژوهش از محل اعتبار طرح پژوهش شماره 47607 مورخ 1397/07/04 توسط معاونت پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد تأمین شده که بدین وسیله سپاسگزاری می‌شود.

زیست‌محیطی به‌علت توجه هم‌زمان به جنبه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی ارجحیت دارد و با کاربرد کمتر میزان نیتروژن و آب، عملکرد دانه قابل قبولی در گیاه تولید شد و آلودگی‌های زیست‌محیطی نیز کاهش قابل ملاحظه‌ای دارد.

سپاسگزاری

References

1. Arbab Soleimani, A., and Ezzati, A. 2015. Nutritional value and functional properties of quinoa. Third National Conference on Agriculture and Sustainable Natural Resources. Tehran. (in Persian).
2. Aslan, N. 2007. Application of response surface methodology and central composite rotatable design for modeling the influence of some operating variables of a Multi-ravity Separator for coal cleaning. *Fuel* 86: 769-776.
3. Basra, S. M. A., Iqbal, S., and Afzal, I. 2014. Evaluating the response of nitrogen application on growth, development, and yield of quinoa genotypes. *International Journal of Agriculture and Biology* 16 (5): 886-892.
4. Berti, M., Wilckens, R., Hevia, F., Serri, H., Vidal, L., and Mendes, C. 2000. Fertilization nitrogen ada en quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd). *Ciencia Investigsction Agraria* 27: 81-90. (in Spanish with English abstract).
5. Box, G. E. P., and Hunter, J. S. 1957. Multi-factor experimental designs for exploring response surfaces. *The Institute of Mathematical Statistics*. p. 195-241.
6. Box, G. E. P., and Wilson, K. B. 1951. On the experiment attainment of optimum conditions. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)* 13: 1-45.
7. Clarke, G. M., and Kempson, R. E. 1997. *Introduction to the Design and Analysis of Experiments*. Arnold, London. 334 p.
8. Dean, A., and Voss, D. 2002. *Design and Analysis of Experiments*. Springer Texts in Statistics. New York.
9. Eickhout, B., Bouwman, A. F., and van Zeijts, H. 2006. The role of nitrogen in world food production and environmental sustainability. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 116: 4-14.
10. Erley, G. S. A., Kaul, H., 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.
11. Geren, H. 2015. Effects of different nitrogen level on the grain yield and some yield components of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) under Mediterranean climatic conditions. *Turkish Journal of Field Crops* 20: 59-64.
12. Goma, E. F. 2013. Effect of nitrogen, phosphorus, and biofertilizers on quinoa plant. *Journal of Applied Sciences Research* 9 (8): 5210-5222.
13. Hatermink, A. E., Johnston, M. O., Sullivan, J. N., and Poloma, S. 2000. Nitrogen use efficiency of taro and sweet potato in the humid lowlands of Papua New Guinea. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 79: 271-280.
14. Heidari, N., Pouryousef, M., and Tavakoli, A. 2014. Effects of drought stress on photosynthesis, its parameters and relative water content of anise (*Pimpinella anisum* L.). *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology)* 27 (5): 829-839. (in Persian with English abstract).
15. Hosseinzad, J., Kazemieh, F., Javadi, A., and Ghafouri, H. 2013. Agricultural water management basis and mechanisms in Tabriz plain. *Water and Soil Science* 23 (2): 85-98. (in Persian with English abstract).
16. Jacobsen S. E., Liu, F., and Jensen, C. R. 2009. Does root-sourced ABA play a role for regulation of stomata under drought in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Scientia Horticulture* 122 (2): 281-287.
17. Jacobsen, S. E. 1998. Developmental stability of quinoa under European conditions. *Industrial crops and products* 7: 169-174.
18. Jamali, S. 2016. Investigation the effect of different salinity and deficit-irrigation levels on yield and yield components of quinoa. M.Sc. Thesis, College of agriculture, Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources. Gorgan. Iran. (in Persian with English abstract).
19. Jamali, S., Goldani, M., and Zeynodin, S. M. 2019. Evaluation the effects of periodic water stress on yield, yield components and water productivity on quinoa. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 6 (13): 1687-1697. (in Persian with English abstract).
20. Jayme-Oliveira A., Ribeiro Júnior, W. Q., Ramos, M. L. G., Ziviani, A. C., and Jakelaitis, A. 2017. Amaranth, quinoa, and millet growth and development under different water regimes in the Brazilian Cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 52 (8): 561-571.
21. Kalavathy, H. M., Regupathib, I., Pillai, M. G., and Miranda, L. R. 2009. Modelling, analysis and optimization of adsorption parameters for H₃PO₄ activated rubber wood sawdust using response surface methodology (RSM). *Colloids and Surfaces B: Bionterfaces* 70: 35-45.
22. Kazemi, M., Alizadeh, A., and Sharifan, H. 2019. Assessing different irrigation levels on Yield and Yield

- components of quinoa genotypes. Fourth National Research Conference on Development and Extension in Agriculture, Natural Resources, and Environment. Jiroft, Iran. (in Persian).
23. Keshavarz, A., and Dehghani Sanij, H. 2012. Water Productivity Index and Solutions for Future Agricultural Activities in Iran. *Economic Strategy 1*: 199-233. (in Persian with English abstract).
 24. Khajavi-Shojaei, S., Moezzi, A., Norouzi Masir, M., and Taghavi Zahedkolaei, M. 2019. Study of kinetic and Isotherm for ammonium and nitrate adsorption by common reed (*Phragmites australis*) biochar from aqueous solution, *Iranian Journal of Soil and Water Research 50* (8): 2009-2021. (in Persian with English abstract).
 25. Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., Amiri, M. B., and Fallah Poor, F. 2019. Optimization of nitrogen fertilizer and irrigation in wheat cultivation by central composite design. *Journal of Agroecology 11* (2): 515-530. (in Persian with English abstract).
 26. Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., Khorramdel, S., and Morid Ahmadi, S. 2018 Optimization of plant density and nitrogen use in corn (*Zea mays* L.) by Central Composite Design. *Iranian Journal of Field Crops Research 15* (4): 798-810. (in Persian with English abstract).
 27. Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., Moradi, R., and Mansouri, H. 2013. Optimization of water, nitrogen, and density in canola cultivation by central composite design. *Journal of Agroecology 3* (1): 1-16. (in Persian with English abstract).
 28. Kwak, J. S. 2005. Application of Taguchi and response surface methodologies for geometric error in surface grinding process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture 45*: 327-341.
 29. Latifi, H., Khorramdel, S., Nassiri Mahallati, M., and Farzaneh Belgerdi, M. R. 2018. Effects of nitrogen fertilizer and plant density on yield and nitrogen efficiency indices of sesame using a central composite design. *Journal of Plant Production Research 25* (3): 125-140. (in Persian).
 30. Lilian, E. A. J. 2009. Chapter 1: Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): Composition, Chemistry, Nutritional, and Functional Properties. *Advances in Food and Nutrition Research 58*: 1-3.
 31. Manivannan, P., Abdul Jaleel, C., Sankar, B., Kishorekumar, A., Somasundaram, R., Lakshmanan, G. M. A., and Panneerselvam, R. 2007. Growth, biochemical modifications and proline metabolism in (*Helianthus annuus* L.) as induced by drought stress. *Colloids and Surfaces 59*: 141-149
 32. Matiasevich, S. B., Castellion, M. L., Maldonado, S. B., and Buera, M. P. 2006. Water-dependent thermal transition in quinoa embryos. *Thermochimica Acta 448*: 117-122.
 33. Montemuro, F., Maiorana, M., Ferri, D., and Convertini, G. 2006. Nitrogen indicators, uptake and utilization efficiency in a maize and barley rotation cropped at different levels and source of N fertilization. *Field Crop Research 99*: 114-421.
 34. Montgomery, D. C. 2001. *Design and Analysis of Experiments*. Fifth ed., John Wiley and Sons, New York.
 35. Myers, R. H., and Montgomery, D. C. 2002. *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. 2nd Edition Wiley, New York.
 36. Obeng, D. P., Morrell, S., and Napier, T. J. N. 2005. Application of central composite rotatable design to modeling the effect of some operating variables on the performance of the three-product cyclone. *International Journal of Mineral Processing 769*: 181-192.
 37. Razzaghi, F., Bahadori-Ghasroldashti, M. R., Henriksen, S., Sepaskhah, A. R., and Jacobsen, S. E. 2020. Physiological characteristics and irrigation water productivity of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) in response to deficit irrigation imposed at different growing stages-A field study from Southern Iran. *Journal of Agronomy and Crop Science 206* (3): 390-404.
 38. Rodrigues, G. C., and Pereira, L. S. 2009. Assessing economic impacts of deficit irrigation as related to water productivity and water costs. *Biosystems Engineering 103*: 536-551.
 39. Sepahvand, N. A., Tavazoa, M., and Kohbazi, M. 2010. Quinoa valuable plant for alimentary security and adaptation agricultural in Iran. 11th National Iranian Congress on Crop Science. 24-26 Jul. Tehran. (in Persian with English abstract).
 40. Shams, A. S. 2012. 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).
 41. Shao, H. C., Yan, C. Y., Ning, Z., Gang, W., Yong-Bing, Y., Chang-Xing, Z., and Zan-Min, H. 2006. Investigation on the relationship of proline with wheat (*Triticum* spp.) anti-drought under soil water deficits. *Colloids and Surfaces 53*: 113-119
 42. Stikic, R., Jovanovic, Z., Majanovic, M., and Dordevic, S. 2015. The effect of drought on water regime and growth of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Ratar. Povrt. 52* (2): 80-84.
 43. Telahigue, D., Ben Yahia, L., Aljane, F., Belhouchett, K., and Toumi, L. 2017. Grain yield, biomass productivity and water use efficiency in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) under drought stress. *Journal of Scientific Agriculture 1*: 222-232.
 44. Yang, A., Akhtar, S. S., Amjad, M., Iqbal, S., and Jacobsen, S. E. 2016. Growth and physiological responses of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to drought and temperature stress. *Journal of Agronomy and Crop Science 202* (6): 445-453.



Optimization of Irrigation and Nitrogen Levels on Yield, Water Use Efficiency, and Nitrogen Use Efficiency of Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) by Using the Surface-Response Methodology

P. Rezvani Moghaddam^{1*}, S. Khorramdel², H. Latifi³, M. R. Farzaneh Belgerdi⁴, S. J. Davarpanah⁵

Received: 19-01-2021

Accepted: 12-05-2021

Introduction

The optimum resource level in agro-ecosystems should be determined to decrease production costs, conserve resources, and mitigate environmental pollutions. Optimization is an effective and sustainable management approach to conserve resources and decline environmental pollutions. Response surface methodology (RSM) is defined as a collection of mathematical and statistical techniques used to develop, improve, or optimize a product. RSM is a statistical technique for optimization of multiple factors that determine optimum rates by combining experimental designs. Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) is a pseudocereal, seed-producing annual crop, and a staple food in South America in ancient times, indigenous to the Andean region of South America, particularly Bolivia, Peru, Ecuador, and parts of Chile, which has the potential to grow with low inputs, mostly water and tolerate a variety of biotic and abiotic stresses. Quinoa seed is gluten-free foods, good sources of carbohydrates, good-quality proteins, lipids, vitamins, minerals, and bioactive compounds, with all the essentials, trace elements, and many vitamins. In this work, optimization of nitrogen and water rates on quinoa was done.

Materials and Methods

An experiment was conducted using *Central Composite Design* (CCD) with 13 treatments and two replications at the Research Field of the Ferdowsi University of Mashhad during the growing season of 2017-2018. The treatments were allocated based on low and high water (2500 and 7500 m³ ha⁻¹, respectively) and nitrogen (0 and 200 kg ha⁻¹, respectively) levels. Seed yield, biological yield, N recovery, N use efficiency (NUE), and water use efficiency (WUE) were calculated as dependent variables, and changes of these variables were evaluated by a regression model. A lack-of-fit test was used to evaluate the quality of the fitted model. The adequacy of the model was tested by analysis of variance. The quality of the fitted models was judged using the determination coefficient (R²). Finally, the optimum nitrogen and water rates were computed based on economic, environmental, and economic-environmental scenarios.

Results and Discussion

The results showed that the effect of linear and square components was significant on all studied characteristics. The interaction effect of full quadratic was significant on NUE and WUE. Lack of fit test had no significant effect on the studied traits. The full square model for the response variables gave insignificant lack-of-fit, indicating that the data were satisfactorily explained. Surface-response results of the effect of irrigation and nitrogen levels on grain yield and biological yield showed that with increasing nitrogen consumption and irrigation, quinoa yield indices increased, but in terms of nitrogen use, with increasing nitrogen consumption more than 100 kg ha⁻¹, the grain yield increased with more slope. The highest value of seed yield was observed for 7500 m³ ha⁻¹ irrigation and 200 kg nitrogen ha⁻¹ with 3835.4 kg ha⁻¹. Optimum nitrogen and water rates were suggested to determine the target range of dependent variables based on three scenarios: economic, environmental, and eco-environmental. It is necessary to use 169.7 kg nitrogen ha⁻¹ and 7500 m³ ha⁻¹ irrigation to obtain optimum conditions under the economic scenario. The optimum nitrogen and irrigation rates based on environmental scenarios were computed from 18.18 kg nitrogen ha⁻¹ and 3409 m³ ha⁻¹ irrigation water. Application of 88.57 kg nitrogen ha⁻¹ and 5909 m³ ha⁻¹ irrigation water was found to be the optimum conditions for the eco-environmental scenario (NUE, N recovery, seed yield, and WUE were calculated with 15.93 kg seed kg⁻¹ N, 50.04%, 3120.76 kg ha⁻¹, and 0.5 kg seed m⁻³ water, respectively).

1- Professor, Department of Agrotechnology, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

2- Associate Professor, Department of Agrotechnology, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

3- PhD Student in Agroecology, Department of Agrotechnology, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

4- MSc in Agrometeorology, Deputy of Insurance Services, Bank Keshavarzi, Khorasan Razavi Province

5- PhD Student in Agroecology, Department of Agrotechnology, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

(*- Corresponding Author Email: rezvani@um.ac.ir)

Conclusions

Increasing nitrogen led to increased seed yield and decreased nitrogen use efficiency, whereas increasing irrigation caused an increase in seed yield and nitrogen use efficiency. In general, it seems that resource use based on the eco-environmental scenario may be a suitable cropping approach for the sustainable production of quinoa as a new crop.

Keywords: *Central Composite Design, Economic- environmental scenario, Lack of fit, New crop, Sustainable production*