بررسی اثر سطوح مختلف سیلیکون بر خصوصیات رشدی و عملکردی کینوا تحت رژیم‌های مختلف آبیاری

چکیده

به‌منظور مطالعه پاسخ‌های مورفو-فیزیولوژیکی و عملکردی کینوا به کوددهی سیلیس تحت شرایط کم آبیاری آزمایشی در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه پیام نور گندمان واقع در استان چهارمحال و بختیاری در سال زراعی ۰۲-۱۴۰۱، به صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل کم آبیاری در چهار سطح در کرت‌های اصلی (۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) و در کرت‌های فرعی تیمار کود سیلیکون (حاوی ۷۵۰ گرم در لیتر SiO_2 و ۴۵ گرم در لیتر K_2O) در چهار سطح (صفر، یک، دو و سه لیتر در هکتار) مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد بیشترین ارتفاع بوته (۱۰۵/۵ سانتی‌متر)، وزن هزاردانه (۳/۲۸ گرم)، عملکرد دانه (۱۸۶۸ کیلوگرم در هکتار) و عملکرد بیولوژیک (۴۶۹۰ کیلوگرم در هکتار) در تیمار ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی و مصرف ۳ لیتر در هکتار سیلیکون بود. بیشترین میزان شاخص برداشت (۵۲/۱ درصد) در تیمار ۶۰ درصد ظرفیت زراعی و یک لیتر و کارایی مصرف آب (۱/۱۴ کیلوگرم در متر مکعب) در تیمار ۴۰ درصد ظرفیت زراعی و سه لیتر در هکتار سیلیکون بدست آمد. در نهایت، هرچند گیاه کینوا نسبت به خشکی دارای مقاومت نسبی خوبی می‌باشد؛ ولی بهترین تیمار برای عملکرد بیشتر کینوا در آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی و مقدار ۳ لیتر در هکتار سیلیکون بود. مصرف ۳ لیتر سیلیکون در هر هکتار، تولید کینوا افزایش یافته و سود خالص، به مقدار ۲۶۷۶۰۰۰۰ تومان بیشتر از عدم کاربرد سیلیکون بود.

واژگان کلیدی: *پانیکول، عملکرد بیولوژیک، شاخص برداشت، کارایی مصرف آب، مورفو-فیزیولوژیک*

ویراستاری نشده

Investigation of the Effect of Different Silicon Levels on Growth and Yield Characteristics of Quinoa Under Various Irrigation Regimes

ABSTRACT

To study the morpho-physiological and yield responses of quinoa to silicon fertilization under drought stress conditions, a field experiment was conducted at the research farm of Payame Noor University, Gandoman, located in Chaharmahal and Bakhtiari province during the 2023-2024 cropping season. The experiment was arranged as split plots based on a randomized complete block design with three replications. The treatments included irrigation at four levels in the main plots (40%, 60%, 80%, and 100% of field capacity), and silicon fertilization (containing 750 grams of SiO_2 and 45 grams of K_2O per liter) at four levels (0, 1, 2, and 3 liters per hectare) in the subplots. The results showed that the highest plant height (105.5 cm), 1000-seed weight (3.28 g), grain yield (1868 kg. ha^{-1}), and biological yield (4690 kg. ha^{-1}) were obtained in the treatment with 100% field capacity and 3 liters per hectare of silicon. Moreover, the highest harvest index (52.1%) was observed in the treatment with 60% field capacity and 1 liter of silicon, while the highest water use efficiency (1.14 $kg.m^3$) was recorded in the treatment with 40% field capacity and 3 liters per hectare of silicon. Ultimately, although quinoa demonstrates a relatively good tolerance to drought, the optimal treatment for maximum quinoa yield was 100% field capacity irrigation and 3 liters per hectare of silicon. With the application of 3 liters of silicon per hectare, quinoa production has significantly increased, resulting in a net profit of 267,600,000 IRR higher compared to when silicon is not applied.

Keywords: *biological yield, morpho-physiological traits, panicle, Water use efficiency, yield index*

مقدمه

کینوا به عنوان یکی از گیاهان با ارزش غذایی بالا و مقاوم به شرایط نامساعد محیطی، توجه بسیاری از پژوهشگران و کشاورزان را به خود جلب کرده است. با این حال، محدودیت‌های آبی و خشکسالی یکی از چالش‌های اساسی در کشت و تولید این گیاه در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود. استفاده از عناصر معدنی مانند سیلیکون به دلیل تأثیرات مثبت آن بر افزایش تحمل به تنش‌های محیطی، بهبود رشد و عملکرد گیاهان تحت شرایط نامساعد آبیاری، به عنوان یک راهکار موثر مطرح شده است. در این راستا، بررسی اثر سطوح مختلف سیلیکون بر خصوصیات رشدی و عملکردی کینوا تحت رژیم‌های مختلف آبیاری می‌تواند اطلاعات مهمی در مورد مدیریت بهینه منابع آبی و استفاده از عناصر تقویتی برای افزایش بهره‌وری کشاورزی ارائه دهد.

ایجاد راهبردهایی که بهره‌وری مصرف آب در کشاورزی آبی را بهبود بخشیده و همزمان تولید مواد غذایی را برای پاسخ به نیازهای فزاینده جمعیت افزایش دهد، ضروری می‌باشد. استراتژی کم آبیاری یک رویکرد زراعی برای بهبود کارایی مصرف آب و مدیریت آب در کشاورزی آبی است (Farooq et al., 2019). این استراتژی شامل انجام آبیاری با مقدار آب کمتر از مقدار مورد نیاز محصولات

است که ممکن است در دوره‌های خاصی از رشد مانند مراحل اولیه یا تقاضای کم آب (Terassi et al., 2021) یا حتی در کل چرخه (Villa et al., 2023) باشد. مزیت اصلی کم‌آبیاری صرفه‌جویی در مصرف آب است، به ویژه در مناطقی که کمبود آب دارند یا آب منبع محدودی است (Shammout et al., 2018). با این حال، ذکر این نکته ضروری است که استفاده از کم‌آبیاری مستلزم آگاهی دقیق از نیاز آبی خاص گیاهان کشت شده و همچنین شرایط محیطی منطقه است. در صورت مدیریت ضعیف، این تکنیک می‌تواند منجر به تنش آبی بیش از حد شود و در نتیجه کاهش قابل توجهی در عملکرد محصول ایجاد شود.

کینوا با نام علمی *Chenopodium quinoa* Wild از خانواده Amaranthaceae و زیر خانواده Chenopodiaceae است. این یک محصول هالوفیتی اختیاری است، با دانه‌های خوراکی بسیار مغذی و غنی از پروتئین (Ahmad et al., 2021). این گیاه در برابر طیف وسیعی از تنش‌های نامطلوب مانند سرما، شوری و خشکی مقاومت قابل توجهی از خود نشان می‌دهد و در خاک‌های حاشیه‌ای به خوبی رشد می‌کند (Ma et al., 2020). حاوی هفت اسید آمینه ضروری، ویتامین‌های فراوان و امگا نه است. محتوای لیزین در دانه‌های آن از گندم پیشی می‌گیرد و آن را برای تعادل رژیم غذایی انسان مطلوب می‌کند. کینوا سدیم کمی دارد اما از نظر کلسیم، فسفر، منیزیم، پتاسیم، آهن، مس و روی نسبت به گندم، ذرت و جو برتری دارد. در مقایسه با گندم از نظر چربی، کربوهیدرات و ویتامین غنی‌تر است. کینوا دارای محتوای معدنی استثنایی با خواص آنتی‌اکسیدانی است (Jamali and Sharifan, 2018). طبق آخرین آمار جهانی، سطح زیر کشت کینوا در دنیا حدود ۲۰۰ هزار هکتار بود که عمدتاً در کشورهای آمریکای جنوبی مانند بولیوی، پرو و اکوادور متمرکز است. تولید جهانی کینوا در حدود ۱۷۰ هزار تن در سال است. در ایران نیز، با توجه به تلاش‌های اخیر برای ترویج کشت این محصول به دلیل سازگاری آن با شرایط اقلیمی خشک، سطح زیر کشت آن در حال افزایش است و در سال‌های اخیر به حدود ۱۵۰۰ هکتار رسیده است (FAO., 2022). هر چند از کینوا در دسته گیاهان مقاوم به خشکی یاد می‌شود اما تنش خشکی به‌عنوان مهم‌ترین عامل محدودکننده در سیستم‌های تولید محصول در مناطق خشک و نیمه‌خشک برجسته می‌شود (Fahad et al., 2017). اثرات منفی ناشی از کمبود آب در گیاهان در جنبه‌های مورفولوژیکی، عملکردی، فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و مولکولی رخ می‌دهد (Seleiman et al., 2021).

چندین ماده به عنوان محرک زیستی استفاده می‌شود که به عنوان کاهش‌دهنده تنش غیر زنده مانند خشکی عمل می‌کند، که به مواد آلی تقسیم می‌شوند، مانند عصاره جلبک دریایی، مواد هیومیک و مواد هیدرولیز شده و معدنی مانند سیلیکون (Si) (Cristofano et al., 2021). اثرات مفید کاربرد Si در بسیاری از گونه‌های گیاهی در مطالعات گزارش شده است. Si باعث افزایش تولید و کیفیت میوه (Ferrón-Carrillo et al., 2022)، تقویت بیولوژیکی گیاهان برای مصرف انسان (Hidalgo-Santiago et al., 2021)، افزایش در

دسترس بودن و تجمع برخی از ماکرو و ریز مغذی‌ها و افزایش کارایی مصرف آب می‌شود (Rea et al., 2022). مزایا در محصولات برنج و گندم مشهودتر است (Rea et al., 2022). قوی‌ترین اثرات کاربرد Si در گیاهان تحت تنش‌های غیرزیستی یا زیستی مشاهده می‌شود (Rea et al., 2022). گزارش شده است محلول‌پاشی سیلیکون اثرات دمای بالا را در گیاهان خیار گلخانه‌ای کاهش می‌دهد (Basirat and Mousavi, 2022). در ادامه، این محققان بیان داشتند تیمار سیلیکون تغییراتی را در غلظت عناصر غذایی برگ در شرایط دمایی بالا نشان دادند که باعث بهبود عملکرد کل و قابل فروش و کاهش درصد میوه های تغییر شکل یافته شد (Basirat and Mousavi, 2022). محققان گزارش دادند سیلیکون با مکانیسم‌های مختلف، تحمل گیاهان را به تنش‌های شوری و خشکی از جمله تنظیم روابط آبی گیاه، تبادل گاز، فتوسنتز، تعادل مواد مغذی، کاهش استرس اکسیداتیو، کاهش سمیت یونی، تنظیم اسمزی و رشد ریشه، جذب پتاسیم و تحریک هورمون های گیاهی بهبود می‌بخشد (Cheraghi et al., 2023). نتیجه مطالعه پرویزنیا و همکاران (Parviznia et al., 2021) بر روی گیاه ذرت نشان داد سیلیسیم از طریق افزایش مساحت سطح ریشه موجب جذب بیشتر این عنصر شد و میزان شاخص تحمل به تنش خشکی را در ارقام مختلف افزایش دادند.

سیلیکون به حفظ فتوسنتز و تعرق بالاتر و افزایش جذب آب ریشه کمک می‌کند (Chen et al., 2018). این عنصر ویژگی‌های تشریحی برگ را بهبود می‌بخشد، فراساختار کلروپلاست‌ها را حفظ می‌کند و از غشاهای بیولوژیکی محافظت می‌کند (Merwad et al., 2018). مطالعات انجام شده نشان دهنده آن است که سیلیکون در بسیاری موارد با تحریک رشد، افزایش در فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، موجب حفاظت گیاه در برابر تنش‌های محیطی می‌شود (Zhang et al., 2017). همچنین گزارش شده است سیلیکون در افزایش محتوای کلروفیل، هدایت روزنه‌ای، مواد فتوسنتزی و استحکام گیاهان تحت شرایط تنش‌زا مؤثر است (Irfan et al., 2023). به‌طور کلی سیلیکون از طریق بهبود فعالیت فتوسنتزی، افزایش فعالیت آنزیم‌ها، افزایش مواد محلول در آوند چوبی و حفاظت مکانیکی در برابر سمیت عناصر سنگین سبب مقاومت گیاه به تنش‌های محیطی می‌شود (Mousavi, 2022).

ادغام تکنیک‌های سازگار با محیط زیست مانند کم آبیاری و کاربرد عناصر غذایی یک استراتژی پایدار است که می‌تواند در سیستم‌های کشاورزی مورد مطالعه قرار گیرد. بسیاری از مطالعات نتایج مثبت کاربرد Si را به عنوان تضعیف کننده کمبود آب نشان می‌دهند، اما بیشتر آنها از محلول‌پاشی استفاده می‌کنند. ممکن است کاربرد از طریق خاک (کوددهی) جایگزین مناسبی برای کاربرد این عنصر مفید باشد. اگرچه کاهش تنش گیاهی با واسطه Si به طور گسترده در محصولات مختلف، به ویژه محصولات غلات مانند برنج و گندم مورد بررسی قرار گرفته است، اطلاعات محدودی در مورد نقش مفید کاربرد خاکی Si در گیاه کینوا تحت تنش آبی در دسترس است. ممکن است لازم باشد بر روی گیاهانی که به طور گسترده کشت می‌شوند تمرکز کنیم تا درک بهتری داشته باشیم و

ارزش بالقوه آنها را در زراعت کشف کنیم. این مطالعه با هدف تعیین نقش مفید سیلیکون به عنوان یک تغذیه گیاهی از طریق کوددهی به عنوان یک کاهش‌دهنده تنش آبی در گیاه کینوا و تعریف یک استراتژی احتمالی کم آبیاری برای افزایش کارایی آب در این محصول انجام شد.

مواد و روش

این پژوهش به‌منظور مطالعه پاسخ‌های مورفو–فیزیولوژیکی و عملکردی کینوا به کوددهی سیلیس تحت شرایط کم آبیاری در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه پیام نور مرکز گندمان واقع در استان چهارمحال و بختیاری در سال زراعی ۰۲–۱۴۰۱ انجام شد. قبل از اجرای آزمایش، به‌منظور بررسی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی، از خاک مزرعه نمونه‌برداری شد (جدول ۱).

جدول ۱- نتایج تجزیه شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی (۳۰-۰) سانتی متری

	بافت خاک	نیتروژن (٪)	فسفر($mg\ kg^{-1}$)	پتاسیم($mg\ kg^{-1}$)	کربن آلی (٪)	شوری (دسی زیمنس بر متر)	اسیدیته
خاک آزمایش	سیلتی لومی	۰/۰۴۵	۱۴/۳	۲۵۷	۰/۴۹	۱/۳۱	۷/۶۲
حد نرمال برای گیاه کینوا	سیلتی لومی –لومی شنی	۰/۱ تا ۰/۲	۱۰ تا ۲۰	۱۵۰ تا ۲۵۰	۱ تا ۲	کمتر از ۴	۶ تا ۷/۵

آزمایش به صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار بود. کم آبیاری در چهار سطح در کرت‌های اصلی (۴۰ درصد، ۶۰ درصد، ۸۰ درصد و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) و در کرت‌های فرعی تیمار کود سیلیکون در چهار سطح (صفر، یک، دو و سه لیتر در هکتار) مورد آزمایش قرار گرفت. هر کرت شامل شش ردیف کاشت و با فاصله بین ردیف ۵۰ سانتی‌متر و طول سه متر در نظر گرفته شد. بین کرت های اصلی چهار ردیف نکاشت در نظر گرفته شد. فاصله بین هر دو بلوک هم دو متر بود. کاشت در در اواخر اردیبهشت ماه صورت گرفت. پس از کشت بلافاصله آبیاری به روش آبیاری قطره‌ای و با استفاده از لوله‌های تیپ انجام و برای اطمینان از سبز شدن مطلوب بذور آبیاری هفت روز بعد تکرار شد. در مرحله دو تا هشت برگی، بوته‌های اضافی تنک شدند. رقم مورد استفاده در این آزمایش تریکاکا بود.

برای اعمال کم آبیاری، ابتدا ظرفیت زراعی مزرعه تعیین شد. برای این کار، کرتی به ابعاد ۲×۲ m تهیه و به‌طور کامل از آب پر شد. سپس روی آن با پلاستیک محصور تا خاک کاملاً اشباع شد. پس از مدت ۲۴ ساعت که آب موجود در خلل و فرج‌های درشت خاک توسط نیروی ثقل خارج شد، پلاستیک برداشته شد. در این هنگام، نمونه‌ای از خاک تهیه، پس از توزین در آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۲۴ ساعت قرار داده شد. سپس نمونه را با ترازوی دقیق وزن و میزان رطوبت تبخیر شده محاسبه شد (Ghavamsaeidi et al., 2021).

جهت اعمال تیمار آبیاری، حجم آب مصرفی مـورد نیـاز از طریق معادله زیر (۱) محاسبه شد (Ghavamsaeidi et al., 2021).

معادله ۱: $$V = ((FC - \theta m) \times Pb \times D_{root} \times A)/Ei$$

که در این رابطه، V: حجم آب آبیــاری بــر حســب متر مکعب، FC: درصد رطوبت وزنی خاک در حد ظرفیـت زراعی، θm: درصد رطوبــت وزنی خــاک قبــل از آبیــاری، Pb: وزن مخصوص ظاهری خاک (گرم بر سانتی‌مترمکعب)، D_{root}: عمق توسعه ریشه بر حسب متر، A: مساحت آبیاری شده بر حسب مترمربع، E_i: راندمان آبیاری می‌باشد. آب مصرفی در تیمارهای ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی به‌ترتیب ۱۰۹۸، ۱۶۴۷، ۲۱۹۶ و ۲۷۴۶ متر مکعب در هکتار بود. اعمال کم آبیاری ۳۰ روز پس از کاشت و اعمال کود سیلیکون در دو مرحله ۳۰ و ۶۰ روز پس از کاشت انجام شد.

محصول Totale Silício® متعلق به شرکت Fertiláqua و تولید کشور برزیل به‌عنوان منبع سیلیکون استفاده شد. این محصول حاوی ۷۵۰ گرم در لیتر SiO_2 و ۴۵ گرم در لیتر K_2O که یک مایع در سوسپانسیون با چگالی ۱/۲۰ گرم در لیتر است. مصرف کود به‌صورت مایع و مقادیر آنها بر اساس تیمارهای آزمایش اعمال شد.

به‌منظور اندازه‌گیری صفات مورفولوژیک و اجزای عملکرد شامل ارتفاع بوته (متر)، سطح برگ (توسط دستگاه Leaf area meter)، تعداد دانه در پانیکول و وزن هزاردانه (ترازو) تعداد سه بوته در هر کرت به صورت تصادفی انتخاب و صفات فوق بر روی آنها اندازه گیری و ثبت شد. جهت اندازه‌گیری عملکرد در واحد سطح، عملکرد بیولوژیک و محاسبه شاخص برداشت (عملکرد دانه به عملکرد بیولوژیک در ۱۰۰)، پس از حذف یک متر از ابتدا و انتهای هر کرت، کل گیاهان ۲ ردیف میانی برداشت شدند و وزن خشک کل بوته‌ها (بعد از خشک کردن در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد داخل آون با استفاده از ترازو) به همراه وزن دانه ثبت شد.

برای اندازه‌گیری نیتروژن عصاره نمونه‌ها به روش هضم توسط اسید سولفوریک، اسید سالیسیلیک، آب اکسیژنه و سلنیم تهیه شد (Emami, 1996). همچنین برای اندازه‌گیری عنصر فسفر و پتاسیم عصاره نمونه‌ها توسط هضم به روش سوزاندن خشک و ترکیب با اسید کلریدریک تهیه شد (Chapman and Pratt, 1961). مقدار نیتروژن موجود در عصاره تهیه شده با استفاده از دستگاه کجلدال تک اتوآنالیزر تعیین شد. میزان فسفر با استفاده از روش رنگ‌سنجی (رنگ زرد مولیبدات وانادات) و با کمک دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۴۷۰ نانومتر اندازه‌گیری شد (Chapman and Pratt, 1961). میزان پتاسیم برگ، با دستگاه فلیم‌فتومتر (UK Jenway) و محلول استاندارد پتاسیم تعیین شد (Waling et al., 1989).

کارایی مصرف آب نیز از معادله (۲) زیر بدست آمد (Zhang and Oweis, 1999):

معادله ۲: (آب مصرفی (لیتر در متر مکعب) / عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار))=کارایی مصرف آب (WUE)

تجزیه و تحلیل داده‌های بدست آمده با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.4 انجام شد. مقایسه میانگین صفات مورد ارزیابی با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد انجام صورت پذیرفت. همچنین رسم شکل با استفاده از نرم‌افزار Excel انجام گرفت.

نتایج و بحث

تجزیه واریانس صفات نشان داد اثرات اصلی کم آبیاری و کود سیلیکون و برهمکنش آنها بر روی صفات ارتفاع بوته، شاخص سطح برگ، تعداد دانه در پانیکول، وزن هزاردانه، عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک در سطح یک درصد و شاخص برداشت در سطح پنج درصد برای برهمکنش دوگانه کم آبیاری × کود سیلیکون معنی‌دار بود (جدول ۲).

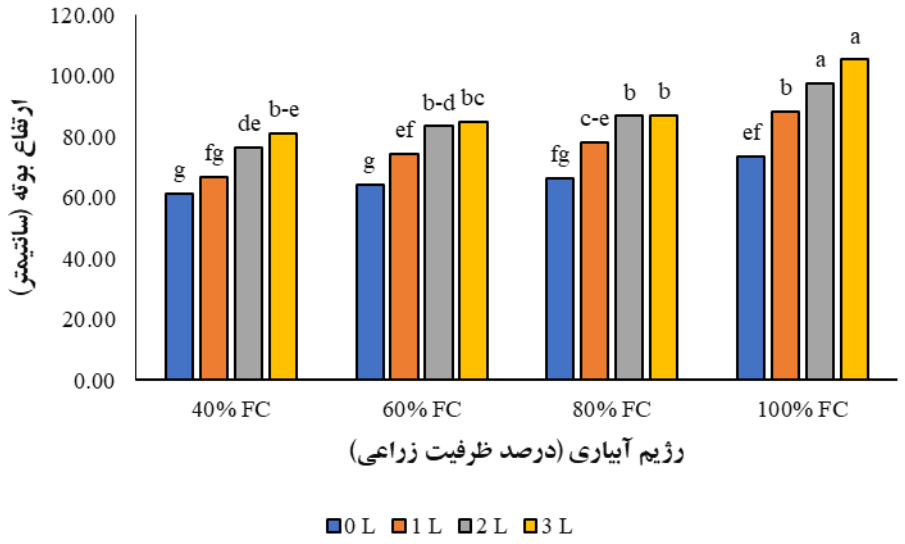
جدول ۲-تجزیه واریانس خصوصیات رشدی و عملکردی گیاه کینوا تحت تاثیر تیمارهای مختلف

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات						
		ارتفاع بوته	شاخص سطح برگ	تعداد دانه در پانیکول	وزن هزاردانه	عملکرد دانه	عملکرد بیولوژیک	شاخص برداشت
بلوک	۲	۵۰/۷^{ns}	۰/۲۰۰**	۸۷۹۱۰^{ns}	۰/۰۰۳^{ns}	۲۸۶۳^{ns}	۱۷۰۰۱۲۲**	۲۵۹**
تنش (A)	۳	۱۲۹۹**	۶/۲۳**	۹۰۰۲۹۵۰**	۲/۱۷**	۱۱۵۵۹۸۶**	۲۳۰۸۹۴۱**	۸۰۱**
خطای a	۶	۳۰/۰	۰/۰۰۶	۱۶۲۷۹۳	۰/۰۱۷	۴۰۷۸	۹۲۰۷۴	۲۱/۴
سیلیکون (B)	۳	۵۳۹**	۲/۲۴**	۱۰۶۳۰۸۷**	۰/۵۱۷**	۷۶۳۶۵۹**	۳۷۳۷۲۰۷**	۲۱۴**
A × B	۹	۱۲۳**	۱/۴۴**	۹۰۷۴۷۲**	۰/۲۸۶**	۱۲۹۴۲**	۱۸۲۰۱۱**	۴۲/۴*
خطای کل	۲۴	۲۲/۳	۰/۰۱۱	۴۳۸۴۰	۰/۰۰۷	۳۲۲۷	۴۶۶۱۶	۱۶/۹
ضریب تغییرات		۵/۹۱	۵/۹۹	۵/۰۶	۳/۵۹	۴/۰۳	۶/۶۲	۹/۲۵

ns، * و ** به‌ترتیب عدم معنی داری، معنی‌داری در سطح پنج درصد و معنی‌داری در سطح یک درصد می‌باشد.

ارتفاع بوته: نتایج مقایسه میانگین صفات نشان داد که در هر چهار سطح رژیم آبیاری، با افزایش مقدار سیلیکون، ارتفاع بوته‌ها افزایش یافت. در رژیم آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی، ارتفاع بوته در تیمار ۳ لیتر سیلیکون در هکتار نسبت به تیمارهای ۲ لیتر، ۱ لیتر و شاهد بدون سیلیکون به ترتیب ۹، ۱۹ و ۴۴ درصد بیشتر بود. در حالی که در رژیم آبیاری ۴۰ درصد ظرفیت زراعی، این افزایش برای تیمار حداکثر تا حداقل سیلیکون به ترتیب ۶، ۲۱ و ۳۳ درصد بود. همچنین، مقایسه بین دو سطح آبیاری ۱۰۰ درصد و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی نشان داد که تفاوت ارتفاع بوته‌ها برای سطوح صفر، یک، دو و سه لیتر در هکتار سیلیکون به ترتیب ۳۰، ۲۸، ۳۲ و ۲۰ درصد بود. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش سطح سیلیکون در هر دو رژیم آبیاری، ارتفاع بوته‌ها بیشتر شد، اما اثرات مثبت سیلیکون در شرایط آبیاری کامل بیشتر نمایان بود (شکل ۱). تنش خشکی و سیلیکون تأثیرات متضادی بر ارتفاع گیاه دارند. خشکی با کاهش دسترسی گیاه به آب و مواد مغذی، منجر به کاهش فتوسنتز و تولید کربوهیدرات‌ها می‌شود، که به نوبه خود باعث کاهش رشد طولی گیاه می‌شود. همچنین، افزایش تولید هورمون‌های تنش‌زا مانند اسید آبسیزیک (ABA) و اتیلن در شرایط

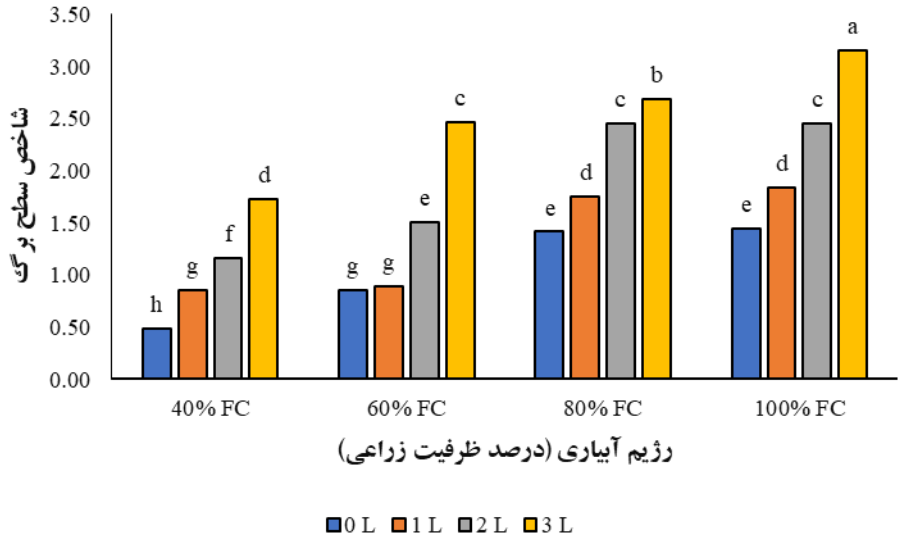
خشکی باعث کاهش تقسیم و توسعه سلولی می‌شود که منجر به کاهش ارتفاع گیاه می‌گردد (Lemoine et al., 2013). در مقابل، سیلیکون به عنوان یک عنصر مفید، با تقویت دیواره‌های سلولی، کاهش تعرق غیرضروری و بهبود کارایی استفاده از آب، می‌تواند مقاومت گیاه را در برابر خشکی افزایش دهد. سیلیکون همچنین جذب و استفاده از عناصر غذایی حیاتی مانند نیتروژن و پتاسیم را بهبود می‌بخشد و تولید هورمون‌های رشد مانند اکسین‌ها و جیبرلین‌ها را تحریک می‌کند، که همگی به افزایش رشد طولی گیاه کمک می‌کنند (Zou et al., 2010). با کاهش اثرات منفی هورمون‌های تنش‌زا و بهبود وضعیت آبی گیاه، سیلیکون می‌تواند به حفظ و حتی افزایش ارتفاع گیاه در شرایط تنش خشکی کمک کند. این تعامل متقابل بین خشکی و سیلیکون نشان می‌دهد که استفاده از سیلیکون می‌تواند به‌طور مؤثری اثرات منفی خشکی را تعدیل کرده و به بهبود رشد و ارتفاع گیاه کمک کند (Irfan et al., 2023).



شکل ۱-برهمکنش دوگانه کم آبیاری و سیلیکون بر ارتفاع بوته گیاه کینوا

شاخص سطح برگ: نتایج نشان داد که در هر چهار سطح رژیم آبیاری، با افزایش سطوح سیلیکون، شاخص سطح برگ بهبود یافت. در رژیم آبیاری ۱۰۰ درصد، شاخص سطح برگ در تیمار ۳ لیتر در هکتار سیلیکون، نسبت به تیمارهای ۲ لیتر، ۱ لیتر و شاهد بدون سیلیکون، به ترتیب ۲۹، ۷۲ و ۱۱۹ درصد افزایش داشت. در حالی که در رژیم آبیاری ۴۰ درصد ظرفیت زراعی، شاخص سطح برگ برای تیمار حداکثری سیلیکون نسبت به حداقل سیلیکون به ترتیب ۴۸، ۱۰۲ و ۲۵۸ درصد افزایش نشان داد. علاوه بر این، مقایسه بین رژیم‌های آبیاری ۱۰۰ درصد و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی نشان داد که شاخص سطح برگ برای سطوح صفر، یک، دو و سه لیتر سیلیکون در هکتار به ترتیب ۸۴، ۱۱۱، ۱۱۷ و ۲۰۰ درصد افزایش یافت. بنابراین، مشخص شد که با افزایش سطوح

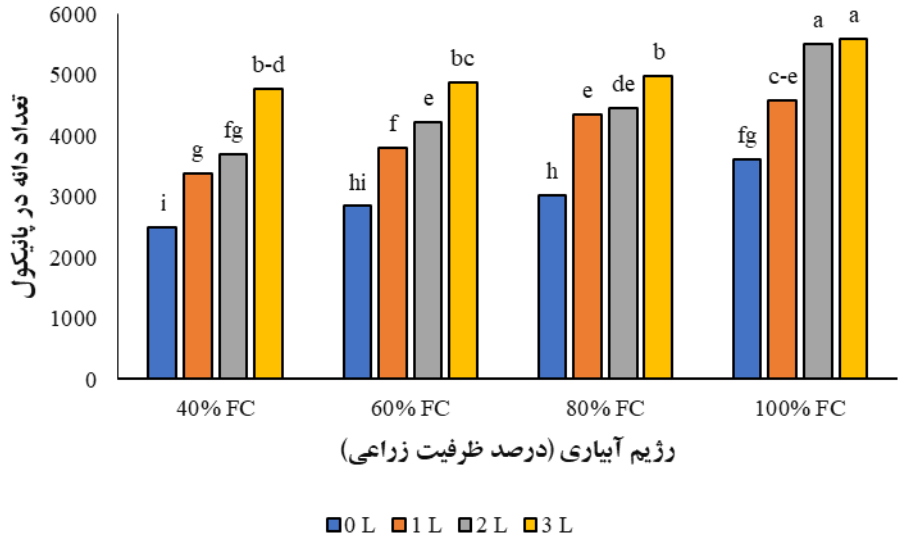
سیلیکون، شاخص سطح برگ در هر دو رژیم آبیاری بهبود می‌یابد، اما تحت شرایط تنش آبی (۴۰ درصد ظرفیت زراعی) تأثیرات مثبت سیلیکون چشمگیرتر بود (شکل ۲). سیلیکون می‌تواند با تقویت دیواره‌های سلولی برگ‌ها، آن‌ها را در برابر تنش خشکی مقاوم‌تر کند و از کاهش سطح برگ‌ها جلوگیری کند (Wang et al., 2021). همچنین محققان بیان داشتند سیلیکون می‌تواند با کاهش تولید اتیلن و ABA در شرایط خشکی، تعادل هورمونی گیاه را بهبود بخشد و از کاهش رشد برگ‌ها جلوگیری کند (Zou et al., 2010). کاربرد سیلیکون باعث افزایش سطح برگ و محتوای کلروفیل (Ning et al., 2020)، بهبود سرعت فتوسنتز، کاهش سرعت تعرق گیاهان ذرت تحت تنش خشکی و در نتیجه افزایش تولید ماده خشک و عملکرد دانه شد (Xie et al., 2014).



شکل ۲-برهمکنش دوگانه کم آبیاری و سیلیکون بر شاخص سطح برگ گیاه کینوا

تعداد دانه در پانیکول: براساس نتایج مقایسه میانگین صفات، در هر چهار سطح رژیم آبیاری، با افزایش سطوح سیلیکون تعداد دانه در پانیکول افزایش یافت. در رژیم آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی، تعداد دانه در پانیکول برای تیمار ۳ لیتر سیلیکون در هکتار نسبت به تیمارهای ۲ لیتر، ۱ لیتر و شاهد بدون سیلیکون به ترتیب ۲، ۲۲ و ۵۵ درصد بیشتر بود. در شرایط آبیاری ۴۰ درصد ظرفیت زراعی، این افزایش برای تیمارهای سیلیکون حداکثر تا حداقل به ترتیب ۲۹، ۴۲ و ۹۱ درصد بود. همچنین، مقایسه دو سطح آبیاری ۱۰۰ درصد و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی نشان داد که تعداد دانه در پانیکول در سطوح صفر، یک، دو و سه لیتر در هکتار سیلیکون به ترتیب ۱۷، ۴۹، ۳۶ و ۴۵ درصد افزایش یافت. بنابراین، مشخص شد که در تمامی سطوح رژیم آبیاری، با افزایش سطوح سیلیکون، تعداد دانه در پانیکول افزایش یافت، اما در شرایط تنش آبی (۴۰ درصد ظرفیت زراعی)، تأثیرات مثبت سیلیکون به‌طور

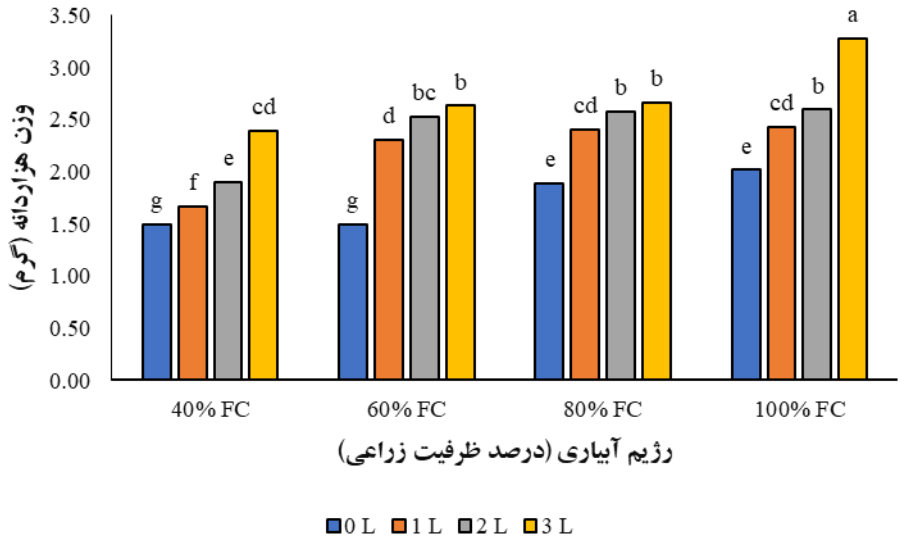
چشمگیرتری ظاهر شد (شکل ۳). به طور کلی، می‌توان بیان داشت برهمکنش کود سیلیکون و تنش خشکی می‌تواند تاثیرات مثبتی بر تعداد دانه در خوشه داشته باشد. استفاده از سیلیکون در شرایط تنش خشکی می‌تواند به بهبود مقاومت گیاه در برابر خشکی، کاهش اثرات منفی هورمون‌های تنش‌زا، بهبود جذب و استفاده از عناصر غذایی و افزایش کارایی استفاده از آب کمک کند. این اثرات می‌توانند منجر به افزایش تعداد دانه‌ها در خوشه و بهبود کلی عملکرد و کیفیت محصول شوند. Gholami et al., (2013) نشان داد که تعداد بالای دانه در خوشه و عملکرد بالا در برنج توسط سیلیکون ثبت شده است. به طور مشابه، Kaya et al., (2006) به این نتیجه رسیدند که کود سیلیکونی رشد و تعداد دانه در بلال را تحت تنش آبی افزایش می‌دهد.



شکل ۳-برهمکنش دوگانه کم آبیاری و سیلیکون بر تعداد دانه در پانیکول گیاه کینوا

وزن هزاردانه: نتایج مقایسه میانگین صفات نشان داد که در سطوح مختلف رژیم آبیاری، با افزایش سطوح سیلیکون، وزن هزاردانه افزایش یافت. در رژیم آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی، وزن هزاردانه در تیمار ۳ لیتر در هکتار سیلیکون نسبت به تیمارهای ۲ لیتر، ۱ لیتر و شاهد بدون سیلیکون به ترتیب ۲۷، ۳۵ و ۶۲ درصد بیشتر بود. در رژیم آبیاری ۴۰ درصد ظرفیت زراعی، این افزایش برای تیمارهای حداکثر تا حداقل سیلیکون به ترتیب ۲۶، ۴۵ و ۶۱ درصد بود. همچنین، مقایسه دو سطح آبیاری ۱۰۰ درصد و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی نشان داد که تفاوت وزن هزاردانه برای سطوح صفر، یک، دو و سه لیتر سیلیکون در هکتار به ترتیب ۳۷، ۳۶، ۴۶ و ۳۶ درصد افزایش یافت. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش سطح سیلیکون، وزن هزاردانه در تمامی سطوح رژیم آبیاری افزایش داشت، اما اثرات سیلیکون بر وزن هزاردانه در هر دو سطح آبیاری ۱۰۰ درصد و ۴۰ درصد ظرفیت

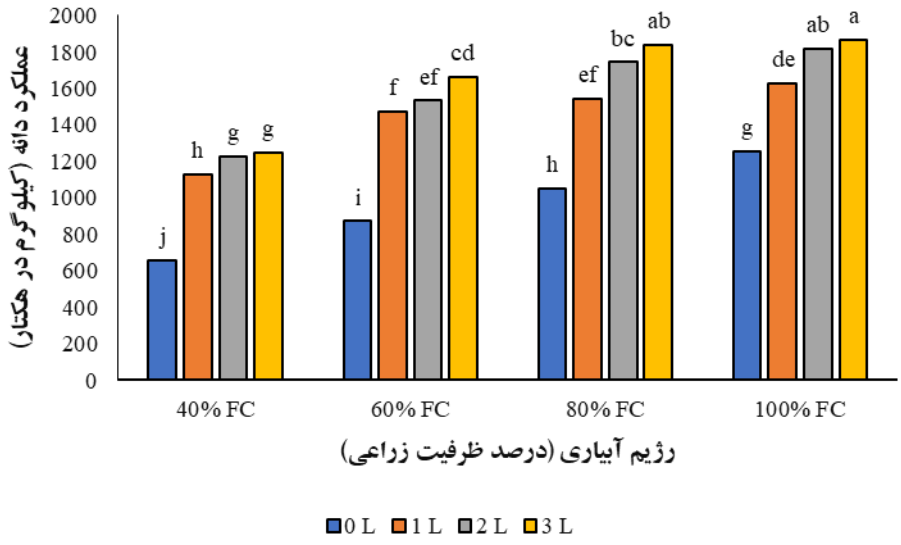
زراعی مشابه بود (شکل ۴). سیلیکون می‌تواند با تقویت دیواره‌های سلولی و افزایش مقاومت گیاه به خشکی، به بهبود رشد و توسعه دانه‌ها کمک کند (Irfan et al., 2023). گزارش شده است سیلیکون با کاهش تولید هورمون‌های تنش‌زا مانند ABA و اتیلن در شرایط خشکی، به بهبود تعادل هورمونی گیاه کمک کرده و رشد دانه‌ها را بهبود بخشد (Wahab et al., 2023). همچنین می‌توان گفت سیلیکون با بهبود عملکرد فتوسنتز در شرایط خشکی، می‌تواند به افزایش تولید کربوهیدرات‌ها و انتقال آن‌ها به دانه‌ها کمک کند که این امر می‌تواند وزن هزاردانه را افزایش دهد. عمدتاً در غلات معمولی با اندازه سنبله بالا در هنگام برداشت، تعداد دانه در سنبله و وزن هزار دانه به دلیل استفاده از سیلیکون بالا ثبت می‌شود (White, 2017). Amin et al., (2016) مشاهده کردند که سیلیکون حداکثر وزن بلال و تعداد زیادی دانه در هر بلال را می‌دهد.



شکل ۴-برهمکنش دوگانه کم آبیاری و سیلیکون بر وزن هزاردانه گیاه کینوا

عملکرد دانه: با توجه به نتایج، در رژیم آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی، عملکرد دانه در تیمار ۳ لیتر در هکتار سیلیکون نسبت به تیمارهای ۲ لیتر، ۱ لیتر و شاهد بدون سیلیکون به ترتیب ۳، ۱۵ و ۴۹ درصد بیشتر بود. در رژیم آبیاری ۴۰ درصد ظرفیت زراعی، این افزایش برای تیمارهای مختلف سیلیکون نسبت به حداکثر و حداقل میزان به ترتیب ۲، ۱۱ و ۸۹ درصد بود. همچنین، مقایسه عملکرد دانه در دو سطح آبیاری ۱۰۰ درصد و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی نشان داد که برای سطوح صفر، یک، دو و سه لیتر سیلیکون در هکتار به ترتیب ۴۹، ۴۸، ۴۵ و ۹۰ درصد افزایش داشته است. به طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش سطح سیلیکون، عملکرد دانه در تمامی سطوح رژیم آبیاری بهبود یافت. در شرایط آبیاری ۱۰۰ درصد نسبت به ۴۰ درصد ظرفیت زراعی،

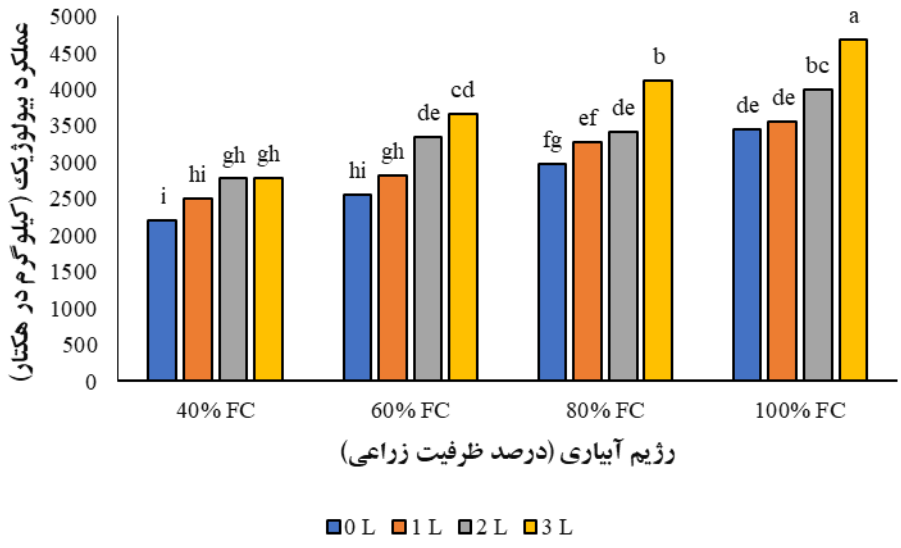
تفاوت عملکرد دانه در تیمار ۳ لیتر سیلیکون نسبت به تیمارهای ۲ لیتر و ۱ لیتر مشابه بود، اما در تیمار شاهد بدون سیلیکون تفاوت‌های قابل توجهی مشاهده شد (شکل ۵). Kovács et al., (2022) به این نتیجه رسید که کود سیلیکون نقش مهمی در افزایش تولید محصولاتی مانند جو، گندم، ذرت و نیشکر دارد. بسیاری از محققان به این نتیجه رسیده‌اند که کاربرد سیلیکون پاسخ مثبتی به رشد، توسعه، بهبود زیست‌توده، گرده‌افشانی و تولید بالای محصول نشان می‌دهد (Korndörfer and Lepsch, 2001). کاربرد سیلیکون رشد محصول، اجزای فیزیولوژیکی و پارامترهای موثر بر عملکرد را بهبود می‌بخشد (Mukhtar et al., 2012). Hattori et al., (2005) نشان دادند که سیلیکون با به حداقل رساندن سرعت تعرق و افزایش ظرفیت نگهداری آب در برگ که منجر به حداکثر سرعت جذب دی‌اکسید کربن می‌شود، تحمل به خشکی را در گیاهان افزایش می‌دهد. به طور مشابه، ثابت شده است که کاربرد سیلیکون رشد گیاه و تولید محصول را افزایش می‌دهد و از برگ‌ها برای دریافت حداکثر نور و افزایش تحمل گیاه در شرایط تنش خشکی حمایت می‌کند (Fawe et al., 2001). Bocharnikova et al., (2010) کارایی کودهای سیلیکونی مختلف را بر روی برنج (*Oryza sativa* L.)، گندم (*Triticum aestivum* L.)، ذرت (*Zea mays* L.) جو (*Hordeum vulgare* L.) بررسی کردند. همه انواع کودهای سیلیکونی به طور قابل ملاحظه‌ای عملکرد محصول را در همه گونه‌ها افزایش دادند.



شکل ۵-برهمکنش دوگانه کم آبیاری و سیلیکون بر عملکرد دانه گیاه کینوا

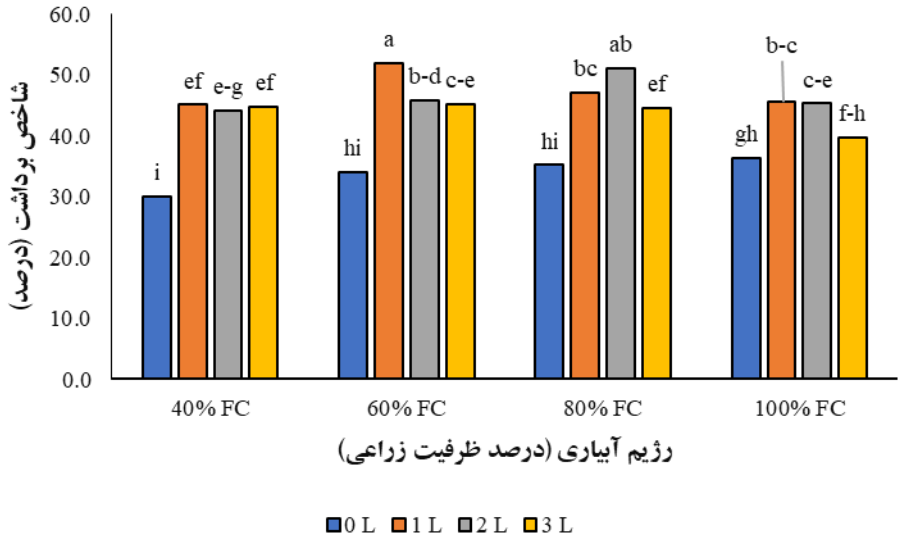
عملکرد بیولوژیک: در سطوح مختلف رژیم آبیاری، با افزایش مقدار سیلیکون، عملکرد بیولوژیک افزایش یافت. در رژیم آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی، عملکرد بیولوژیک در تیمار ۳ لیتر سیلیکون در هکتار نسبت به تیمارهای ۲ لیتر، ۱ لیتر و شاهد

بدون سیلیکون به ترتیب ۱۷، ۳۲ و ۳۶ درصد بیشتر بود. در رژیم آبیاری ۴۰ درصد ظرفیت زراعی، این افزایش برای تیمارهای مختلف سیلیکون نسبت به حداکثر و حداقل میزان به ترتیب ۰٫۴، ۱۲ و ۲۷ درصد بود. همچنین، مقایسه عملکرد بیولوژیک در دو سطح آبیاری ۱۰۰ درصد و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی نشان داد که برای سطوح صفر، یک، دو و سه لیتر سیلیکون در هکتار به ترتیب ۶۸، ۴۴، ۴۳ و ۵۷ درصد افزایش داشت. به طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش سطح سیلیکون، عملکرد بیولوژیک در تمامی سطوح رژیم آبیاری بهبود یافت، اما اثرات مثبت سیلیکون در شرایط آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی بیشتر مشهود بود (شکل ۶). Sing et al., (2016) اهمیت کاربرد سیلیکون را مورد مطالعه قرار داد و به این نتیجه رسید که نرخ رشد و ماده خشک محصول گندم را در شرایط تنش خشکی بهبود می‌بخشد. بیشتر مطالعات نشان می دهد که ماده خشک بالا، حداکثر تولید محصول، افزایش گرده افشانی و بهبود رشد و نمو محصول از کود سیلیکون در تیمار تنش خشکی ثبت شده است (Ahmed et al., 2011). به طور مشابه، Shen et al., (2010) گزارش داد که کاربرد سیلیکون نقش عمده‌ای در افزایش محتوای ماده خشک گیاهان سورگوم و سویا در تنش خشکی ایفا می‌کند. Bocharnikova et al., (2010) تحقیقی با هدف تعیین اثر کود سیلیکون بر مقاومت به خشکی جو انجام داد. آنها دی اکسید سیلیکون آمورف، سیلیکات کلسیم و محلول اسید مونوسیلیک (غلظت ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیسیم) را اعمال کردند. تولید زیست‌توده جو در نتیجه استفاده از ترکیبات حاوی سیلیکون ۱۰ تا ۵۳ درصد افزایش یافت و گیاهان مقاومت بیشتری نسبت به تنش خشکی نشان دادند. آزمایش‌های دیگر تأثیر مثبت کاربرد سیلیکون را بر حفظ پتانسیل آب، کاهش تأثیر منفی تنش خشکی و افزایش عملکرد و تولید زیست توده گندم ثابت کردند (Parveen et al., 2022).



شکل ۶-برهمکنش دوگانه کم آبیاری و سیلیکون بر عملکرد بیولوژیک گیاه کینوا

شاخص برداشت: با توجه به نتایج مقایسه میانگین صفات، در تمامی چهار سطح رژیم آبیاری، تیمارهای سیلیکون با مقادیر یک، دو و سه لیتر در هکتار نسبت به تیمار شاهد دارای شاخص برداشت بالاتری بودند، هرچند که این سه سطح در شرایط مختلف رژیم آبیاری رفتار متفاوتی از خود نشان دادند. نتایج نشان داد که بیشترین شاخص برداشت در رژیم آبیاری ۶۰ درصد ظرفیت زراعی و تیمار سیلیکون یک لیتر در هکتار به میزان ۵۲/۱ درصد به دست آمد. در مقابل، کمترین شاخص برداشت در تیمار ۴۰ درصد ظرفیت زراعی و شاهد بدون سیلیکون با مقدار ۳۰ درصد ثبت شد، که از نظر آماری با تیمارهای ۶۰ و ۸۰ درصد ظرفیت زراعی و شاهد بدون سیلیکون تفاوت معنی‌داری نداشت (شکل ۷). از آنجایی که یکی از اجزای محاسبه شاخص برداشت عملکرد دانه است، تغییرات شاخص برداشت وابستگی زیادی به تغییرات عملکرد دانه دارد. لیکن، بر اساس معادله شاخص برداشت چون تنش خشکی اثر کاهشی بارزی بر عملکرد بیولوژیک داشته، در حالی که تأثیر آن بر عملکرد دانه به طور نسبی کمتر بوده است، لذا شاخص برداشت در این شرایط کاهش کمتری نشان داده است (Farokhian et al., 2021). از دلایل کاهش عملکرد دانه در اثر تنش کم‌آبی کوتاه شدن دوره رشد و تسریع پیری برگ‌هاست. البته کاهش سطح فتوسنتز کننده، تولید اسیمیلات فتوسنتزی و نهایتاً رشد کمتر گیاه در شرایط تنش‌زا، می‌تواند به کاهش عملکرد اقتصادی و متعاقب آن در کاهش شاخص برداشت مؤثر باشد (Fahad et al., 2017).



شکل ۷-برهمکنش دوگانه کم آبیاری و سیلیکون بر شاخص برداشت گیاه کینوا

با توجه به نتایج تجزیه واریانس صفات، اثرات اصلی کم آبیاری و سیلیکون و برهمکنش آنها بر میزان پتاسیم، فسفر، نیتروژن و کارایی مصرف آب در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳).

جدول ۳-تجزیه واریانس عناصر ماکرو موجود در برگ گیاه کینوا تحت تاثیر تیمارهای مختلف

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات			
		پتاسیم	فسفر	نیتروژن	کارایی مصرف آب
بلوک	۲	۰/۰۳۹^{ns}	۰/۰۰۰۲*	۰/۱۵۰*	۰/۰۰۲^{ns}
تنش (A)	۳	۱/۰۰**	۰/۰۰۲**	۰/۴۱۳**	۰/۳۴۷**
خطای a	۶	۰/۰۱۴	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۲۰	۰/۰۰۲
سیلیکون (B)	۳	۰/۴۰۳**	۰/۰۰۱**	۰/۰۳۷**	۰/۲۱۰**
A × B	۹	۰/۶۴۶**	۰/۰۰۱**	۰/۰۳۲**	۰/۰۱۵**
خطای کل	۲۴	۰/۰۳۳	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۷	۰/۰۰۰۸
ضریب تغییرات		۷/۵۸	۳/۱۲	۳/۷۳	۱۴/۲

ns، * و ** به‌ترتیب عدم معنی داری، معنی‌داری در سطح پنج درصد و معنی‌داری در سطح یک درصد می‌باشد.

پتاسیم برگ: در رژیم آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی، میزان پتاسیم در تیمار ۳ لیتر سیلیکون در هکتار نسبت به تیمارهای ۲ لیتر، ۱ لیتر و شاهد بدون سیلیکون به ترتیب ۸، ۳۷ و ۳۸ درصد بیشتر بود. در رژیم آبیاری ۴۰ درصد ظرفیت زراعی، افزایش میزان پتاسیم برای تیمارهای با بالاترین تا کمترین میزان سیلیکون به ترتیب ۱۲، ۳۷ و ۳۸ درصد مشاهده شد. همچنین، مقایسه بین دو سطح آبیاری ۱۰۰ درصد و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی نشان داد که میزان پتاسیم در سطوح صفر، یک، دو و سه لیتر سیلیکون در هکتار به ترتیب ۵۹، ۶۵، ۳۴ و ۴۵ درصد افزایش یافته است. به طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سطح سیلیکون در هر دو رژیم آبیاری، میزان پتاسیم برگ افزایش یافت، اما اثرات مثبت سیلیکون در شرایط آبیاری کامل بیشتر بود (جدول ۴). سیلیکون با تنظیم متابولیسم گیاه و کاهش تولید اتیلن و ABA، به گیاه کمک می‌کند تا بهتر با تنش خشکی سازگار شود (Khan et al., 2023). از سوی دیگر، سیلیکون با افزایش کارایی استفاده از آب و کاهش تعرق غیرضروری، به گیاه کمک می‌کند تا در شرایط خشکی بهتر عمل کند و در نتیجه، پتاسیم بیشتری در گیاه حفظ شود (Ramírez-Olvera et al., 2021). از سوی دیگر گزارش شده است سیلیکون با تقویت دیواره‌های سلولی و بهبود ساختار فیزیکی گیاه، از خروج پتاسیم از سلول‌ها جلوگیری می‌کند (Khan et al., 2023). مکانیسم‌های مختلف توسط سیلیکون برای افزایش تحمل املاح در شرایط تنش خشکی در گیاهان اتخاذ می‌شود. به طور مشابه، Chen et al., (2014) و Garg and Bhandari, (2015) به این نتیجه رسیدند که حضور سیلیکون در خاک جذب سدیم توسط گیاهان را کاهش می‌دهد و نسبت پتاسیم و سدیم را بهبود می‌بخشد.

فسفر برگ: نتایج نشان داد که در تیمارهای مختلف آبیاری، با افزایش مقدار سیلیکون، میزان فسفر در برگ‌ها افزایش یافت. در رژیم آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی، تیمار ۳ لیتر سیلیکون در هکتار به ترتیب ۶، ۱۵ و ۲۲ درصد نسبت به تیمارهای ۲ لیتر، ۱ لیتر و شاهد بدون سیلیکون، میزان فسفر بیشتری داشت. در شرایط آبیاری ۴۰ درصد ظرفیت زراعی، افزایش میزان فسفر در

تیمارهای مختلف سیلیکون نسبت به حداکثر و حداقل مقادیر به ترتیب ۲۹، ۳۱ و ۵۱ درصد بود. علاوه بر این، مقایسه بین دو سطح آبیاری ۱۰۰ درصد و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی نشان داد که میزان فسفر در سطوح صفر، یک، دو و سه لیتر سیلیکون در هکتار به ترتیب ۲۳، ۵۱، ۴۱ و ۵۳ درصد افزایش یافته است. به طور کلی، نتایج حاکی از آن است که افزایش سطوح سیلیکون موجب افزایش میزان فسفر در برگ‌ها در تمامی سطوح رژیم آبیاری شده است. با این حال، اثرات مثبت سیلیکون در شرایط تنش آبی (۴۰ درصد ظرفیت زراعی) به مراتب بیشتر از شرایط آبیاری کامل مشاهده شد (جدول ۴). Epstein and Bloom, (2024) به این نتیجه رسید که سیلیکون باعث افزایش دسترسی به مواد مغذی مانند فسفر و نیتروژن در طول تنش خشکی می‌شود. گزارش شده است کودهای سیلیکونی می‌توانند از تبدیل محتوای فسفر غیرقابل دسترس خاک به اشکال در دسترس برای گیاهان افزایش دهند. همانطور که نتایج آزمایشات مزرعه‌ای آنها نشان داد، استفاده از کودهای سیلیکونی مایع یا جامد منجر به جایگزینی آنیون فسفات با آنیون سیلیکات از کلسیم، آلومینیوم و فسفات آهن شد (Kovács et al., 2022). Kovács et al., (2022) در تحقیقات خود در مورد اثر سیلیکات موجود بر محصولات دریافت که استفاده از کودهای سیلیکات مختلف باعث افزایش جذب فسفر و عملکرد جو می‌شود. او شواهدی مبنی بر افزایش جذب فسفر از کود سوپر فسفات اعمال شده پیدا نکرد. سیلیکات عمدتاً بر روی حرکت محتوای فسفر طبیعی خاک تأثیر دارند.

نیتروژن برگ: با توجه به نتایج مقایسه میانگین صفات، در تمامی چهار سطح رژیم آبیاری، افزایش مقدار سیلیکون موجب افزایش میزان نیتروژن در برگ‌ها شد. در رژیم آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی، میزان نیتروژن در تیمار ۳ لیتر سیلیکون در هکتار نسبت به تیمارهای ۲ لیتر، ۱ لیتر و شاهد بدون سیلیکون به ترتیب ۲، ۲ و ۹ درصد بیشتر بود. در رژیم آبیاری ۴۰ درصد ظرفیت زراعی، تفاوت میزان نیتروژن برای تیمارهای با بیشترین تا کمترین مقدار سیلیکون به ترتیب ۷، ۱۱ و ۱۴ درصد افزایش یافت. همچنین، مقایسه دو سطح آبیاری ۱۰۰ درصد و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی نشان داد که میزان نیتروژن در سطوح صفر، یک، دو و سه لیتر سیلیکون در هکتار به ترتیب ۱۷، ۲۳، ۲۷ و ۲۲ درصد افزایش یافته است. به طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش سطح سیلیکون در هر دو رژیم آبیاری موجب افزایش میزان نیتروژن برگ شد، اما تأثیرات مثبت سیلیکون در شرایط تنش آبی (۴۰ درصد ظرفیت زراعی) بیشتر مشهود بود (جدول ۴). کود سیلیکون می‌تواند بهبود جذب نیتروژن را حتی در شرایط خشکی افزایش دهد. سیلیکون با تقویت سیستم ریشه‌ای و افزایش فعالیت آنزیم‌های مرتبط با جذب پتاسیم، به جذب بهتر این عنصر کمک می‌کند (Khan et al., 2023). همچنین، افزایش تولید ترکیبات آنتی‌اکسیدانی و سایر ترکیبات محافظتی به کمک سیلیکون، می‌تواند اثرات منفی تنش خشکی بر متابولیسم نیتروژن را کاهش دهد (Zargar et al., 2019). Neu et al., (2017) در تحقیقات خود که در آلمان انجام

شد دریافتند که کود سیلیس باعث افزایش تولید زیست‌توده در سطح زمین و کارایی استفاده از مواد مغذی (به ویژه نیتروژن) گندم و عملکرد دانه شد. Rehman et al., (2021) نشان دادند که به دلیل اثر هم افزایی سیلیکون، سطح بهینه نیتروژن افزایش می‌یابد که منجر به تولید بالای محصولات می‌شود.

کارایی مصرف آب: نتایج مقایسه میانگین صفات نشان داد که در رژیم آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی، کارایی مصرف آب در تیمار ۳ لیتر سیلیکون در هکتار به ترتیب ۲، ۱۳ و ۵۰ درصد بیشتر از تیمارهای ۲ لیتر، ۱ لیتر و شاهد بدون سیلیکون بود. در شرایط آبیاری ۴۰ درصد ظرفیت زراعی، افزایش کارایی مصرف آب برای تیمارهای با بیشترین تا کمترین مقدار سیلیکون به ترتیب ۲۰، ۴۴ و ۹۰ درصد مشاهده شد. همچنین، مقایسه کارایی مصرف آب بین دو سطح آبیاری ۱۰۰ درصد و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی نشان داد که در سطوح صفر، یک، دو و سه لیتر سیلیکون در هکتار، کارایی مصرف آب به ترتیب ۱۰۵، ۷۴، ۶۰ و ۶۱ درصد کاهش یافت. به طور کلی، این نتایج بیانگر این است که افزایش سطح سیلیکون به بهبود کارایی مصرف آب در هر دو رژیم آبیاری منجر شده است، با این حال، اثرات مثبت سیلیکون در شرایط تنش آبی (۴۰ درصد ظرفیت زراعی) به طور مشهودتری نمایان شده است (جدول ۴). می‌توان بیان داشت سیلیکون با افزایش کارایی استفاده از آب و کاهش تعرق غیرضروری، می‌تواند به گیاه کمک کند تا در شرایط خشکی بهتر عمل کند و در نتیجه وزن دانه‌ها را افزایش دهد. Saud et al., (2024) اظهار داشتند که تیمار سیلیکونی سرعت رشد ریشه‌ها را بهبود می‌بخشد و کل سطوح جاذب را افزایش می‌دهد و باعث بهبود کارایی مصرف آب می‌شود. Lux et al., (2003) به این نتیجه رسیدند که کاربرد سیلیکون انبساط دیواره سلولی ناحیه رشد را افزایش می‌دهد که منجر به افزایش رشد ریشه و حداکثر مصرف آب می‌شود که به مقاومت به خشکی کمک کرده و کارایی مصرف آب را بهبود بخشید.

جدول ۴-برهمکنش دوگانه کم آبیاری و سیلیکون بر عناصر ماکرو و کارایی مصرف آب گیاه کینوا

کم آبیاری (ظرفیت زراعی	سیلیکون (لیتر در هکتار)	پتاسیم (درصد)	فسفر (درصد)	نیتروژن (درصد)	کارایی مصرف آب (کیلوگرم در متر مکعب)
٪ ۴۰	۰	۱/۷۳^{i}	۰/۰۸۵^{i}	۱/۹۷^{h}	۰/۶۰۱^{fg}
	۱	۱/۸۹^{hi}	۰/۰۹۸^{h}	۲/۰۱^{h}	۰/۷۹۴^{d}
	۲	۱/۹۵$^{g-i}$	۰/۰۹۹^{h}	۲/۱۰^{gh}	۰/۹۵۶^{b}
	۳	۲/۱۸$^{f-h}$	۰/۱۲۸^{d}	۲/۲۴$^{e-g}$	۱/۱۴^{a}
٪ ۶۰	۰	۱/۸۹^{hi}	۰/۰۸۶^{i}	۲/۲۲^{fg}	۰/۶۱۰^{f}
	۱	۲/۲۱$^{e-g}$	۰/۱۰۱^{gh}	۲/۲۷$^{d-f}$	۰/۷۹۶^{d}
	۲	۲/۳۱$^{d-f}$	۰/۱۱۲^{f}	۲/۳۱$^{c-f}$	۰/۸۳۴^{cd}
	۳	۲/۴۵$^{c-f}$	۰/۱۲۸^{d}	۲/۳۳$^{c-f}$	۰/۸۸۱^{c}
٪ ۸۰	۰	۲/۲۲$^{e-g}$	۰/۱۰۹^{f}	۲/۲۴$^{e-g}$	۰/۴۷۱^{i}
	۱	۲/۳۹$^{c-f}$	۰/۱۱۵^{e}	۲/۳۸$^{c-e}$	۰/۵۹۰$^{f-h}$
	۲	۲/۶۴^{bc}	۰/۱۳۴^{d}	۲/۴۱^{cd}	۰/۶۷۱^{e}
	۳	۲/۷۷^{b}	۰/۱۴۱^{c}	۲/۴۴^{bc}	۰/۶۹۹^{e}

٪ ۱۰۰	۰	۲/۵۱$^{b-e}$	۰/۱۳۰^{d}	۲/۴۱^{cd}	۰/۳۷۴^{j}
	۱	۲/۵۴$^{b-d}$	۰/۱۳۸^{c}	۲/۵۶^{ab}	۰/۴۹۶^{i}
	۲	۳/۲۲^{a}	۰/۱۴۹^{b}	۲/۵۸^{a}	۰/۵۴۹^{h}
	۳	۳/۴۷^{a}	۰/۱۵۸^{a}	۲/۶۲^{a}	۰/۵۵۹^{gh}

حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده‌ی معنی داری در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

بررسی توجیه اقتصادی

برای محاسبه‌ی توجیه اقتصادی مصرف سیلیکون در تولید گیاه کینوا، هزینه هر لیتر سیلیکون، ۲۶۰ هزار تومان، هر متر مکعب آب، ۳ هزار تومان و قیمت هر کیلو کینوا، ۴۵ هزار تومان لحاظ شد.

سناریوی اول: مصرف سیلیکون

در این سناریو، گیاه کینوا به میزان ۳ لیتر سیلیکون در هر هکتار مصرف کرده است. همچنین ۲،۷۴۶ متر مکعب آب نیز مصرف شده و عملکرد تولید کینوا به ۱،۸۶۸ کیلوگرم در هر هکتار رسیده است.

هزینه‌ها:

هزینه سیلیکون: با مصرف ۳ لیتر سیلیکون و قیمت ۲۶۰،۰۰۰ تومان برای هر لیتر: ۳ × ۲۶۰۰۰۰ = ۷۸۰۰۰۰ تومان

هزینه آب: با مصرف ۲،۷۴۶ متر مکعب آب و قیمت ۳،۰۰۰ تومان برای هر متر مکعب: ۲۷۴۶ × ۳۰۰۰ = ۸۲۳۸۰۰۰ تومان

بنابراین، کل هزینه‌ها در این سناریو: ۷۸۰۰۰۰ + ۸۲۳۸۰۰۰ = ۹۰۱۸۰۰۰ تومان

درآمد: با تولید ۱،۸۶۸ کیلوگرم کینوا و قیمت ۴۵،۰۰۰ تومان برای هر کیلوگرم: ۴۵۰۰۰ × ۱۸۶۸ = ۸۴۰۶۰۰۰۰ تومان

سود خالص: سود خالص برابر است با درآمد منهای کل هزینه‌ها:

۸۴۰۶۰۰۰۰ – ۹۰۱۸۰۰۰ = ۷۵۰۴۲۰۰۰ تومان

سناریوی دوم: بدون مصرف سیلیکون

عدم کاربرد سیلیکونی و فقط ۲،۷۴۶ متر مکعب آب مصرف شد. عملکرد تولید در این حالت ۱،۲۵۶ کیلوگرم در هر هکتار بود.

ویرایش اولیه

هزینه‌ها:

هزینه آب: با مصرف ۲،۷۴۶ متر مکعب آب و قیمت ۳،۰۰۰ تومان برای هر متر مکعب: ۲۷۴۶ × ۳۰۰۰ = ۸۲۳۸۰۰۰ تومان

کل هزینه‌ها در این سناریو همان ۸،۲۳۸،۰۰۰ تومان است.

درآمد: با تولید ۱،۲۵۶ کیلوگرم کینوا و قیمت ۷۵،۰۰۰ تومان برای هر کیلوگرم: ۴۵۰۰۰ × ۱۲۵۶ = ۵۶۵۲۰۰۰۰ تومان

سود خالص: سود خالص برابر است با درآمد منهای کل هزینه‌ها:

۵۶۵۲۰۰۰۰ – ۸۲۳۸۰۰۰ = ۴۸۲۸۲۰۰۰ تومان

مقایسه دو سناریو:

تفاوت سود: مصرف سیلیکون باعث افزایش سود به میزان: ۷۵۰۴۲۰۰۰ – ۴۸۲۸۲۰۰۰ = ۲۶۷۶۰۰۰۰ تومان

نتیجه‌گیری

نتایج این آزمایش به‌طور کلی نشان داد که کم‌آبیاری موجب کاهش خصوصیات رشدی، عملکردی و میزان عناصر موجود در برگ گیاه کینوا می‌شود. در عوض، استفاده از کود سیلیکون تأثیرات منفی کم‌آبیاری را کاهش داد. در تمامی سطوح رژیم‌های آبیاری، کود سیلیکون باعث بهبود صفات مختلف گیاه شد، به ویژه در مواردی چون شاخص سطح برگ، تعداد دانه در پانیکول، فسفر برگ، نیتروژن برگ و کارایی مصرف آب. این بهبود در تیمار ۴۰ درصد ظرفیت زراعی نسبت به تیمار آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی بیشتر بود. به‌طور کلی، هرچند گیاه کینوا نسبت به خشکی مقاومتی نسبی دارد، بهترین عملکرد برای این گیاه در شرایط آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی و با مصرف ۳ لیتر در هکتار سیلیکون مشاهده شد.

سپاسگزاری

بودجه این پژوهش از محل اعتبارات طرح شماره ۴۰۰/د/۱۱/۰۹/۶۱۹۰ مصوب شورای پژوهشی دانشگاه پیام نور تأمین شده که بدین وسیله سپاسگزاری می‌شود.

منابع

ویراستاری نشده

Ahmad, F., Hameed, M., Ahmad, M.S.A. and Ashraf, M. 2021. Ensuring Food Security of Arid Regions through Sustainable Cultivation of Halophytes. In: Grigore, MN. (eds) Handbook of Halophytes. Springer, Cham. https:// doi.org/10.1007/978-3-030-57635-6_89

Ahmed, M., Qadeer, U. and Aslam, M. A. 2011. Silicon application and drought tolerance mechanism of sorghum. African Journal of Agricultural Research. 6(3), 594- 607.

Amin, M., Ahmad, R., Ali, A., Hussain, I., Mahmood, R., Aslam, M. and Lee, D. J. 2018. Influence of silicon fertilization on maize performance under limited water supply. Silicon. 10(2), 177-183.

Basirat, M. and Mousavi, S.M. 2022. Effect of Foliar Application of Silicon and Salicylic Acid on Regulation of Yield and Nutritional Responses of Greenhouse Cucumber Under High Temperature. Journal Plant Growth Regulation. 41, 1978–1988. https://doi.org/10.1007/s00344-021-10562-5.

Bocharnikova, E.A., Loginov, S.V., Matychenkov, V.V. and Storozhenko, P.A. 2010. Silicon fertilizer efficiency. Russian Agricultural Sciences. 36, 446–448.

Chapman, H. D. and P. F. Pratt. 1961. Methods of analysis for soils, plants and waters. University of California, Division of Agricaltural Science.

Chen, D., Wang, S., Yin, L. and Deng, X. 2018. How Does Silicon Mediate Plant Water Uptake and Loss under Water Deficiency? Frontiers in Plant Science. 9, 281.

Chen, D., Yin, L., Deng, X. and Wang, S. 2014. Silicon increases salt tolerance by influencing the two-phase growth response to salinity in wheat (*Triticum aestivum* L.). Acta Physiologiae Plantarum. 36(9): 2531-2535.

Cheraghi, M., Motesharezadeh, B., Mousavi, S.M. 2023. Silicon (Si): A Regulator Nutrient for Optimum Growth of Wheat Under Salinity and Drought Stresses- A Review. Journal Plant Growth Regulation. 42, 5354–5378. https://doi.org/10.1007/s00344-023-10959-4.

Cristofano, F., El-Nakhel, C. and Rouphael, Y. 2021. Biostimulant Substances for Sustainable Agriculture: Origin, Operating Mechanisms and Effects on Cucurbits, Leafy Greens, and Nightshade Vegetables Species. Biomolecules. 11, 1103.

Emami, A. 1996. Methods of plant decomposition. Education and promotion of agriculture. Soil and Water Institute. 130 pages.

Epstein, E. and Bloom, A. J. 2005. Mineral nutrition of plants: principles and perspectives, 2nd edn. Sinauer Assoc. Inc., Sunderland, UK, 2005.

Fahad, S., Bajwa, A. A., Nazir, U., Anjum, S. A., Farooq, A., Zohaib, A., Sadia, S., Nasim, W., Adkins, S., Saud, S., Ihsan, M. Z., Alharby, H., Wu, C., Wang, D. and Huang, J. 2017. Crop Production under Drought and Heat Stress: Plant Responses and Management Options. Frontiers in Plant Science. 8:1147. DOI: 10.3389/fpls.2017.01147.

Fahad, S., Bajwa, A. A., Nazir, U., Anjum, S. A., Farooq, A., Zohaib, A., Sadia, S., Nasim, W., Adkins, S., Saud, S., Ihsan, M. Z., Alharby, H., Wu, C., Wang, D. and Huang, J. 2017. Crop Production under Drought and Heat Stress: Plant Responses and Management Options. Frontiers in Plant Science. 8:1147. DOI: 10.3389/fpls.2017.01147.

Farokhian, SH., Tohidi-Nejad, E. and Mohammadi-Nejad, GH. 2021. Studying the effect of bio-fertilizers on the yield components of Sesame (Sesamum indicum) genotypes under drought stress condition. Central Asian Journal of Plant Science Innovation 1(1): 32–38. DOI: 10.22034/CAJPSI.2021.01.04.

Farooq, M., Hussain, M., Ul-Allah, S. and Siddique, K.H.M. 2019. Physiological and agronomic approaches for improving water-use efficiency in crop plants. Agricultural Water Management. 219: 95–108.

Fawe, A., Menzies, J. G., Chérif, M. and Bélanger, R. R. 2001. Silicon and disease resistance in dicotyledons. Studies in Plant Science. 8: 159-169.

Ferrón-Carrillo, F., Cunha-Chiamolera, T.P.L., Peña, A.A. and Urrestarazu, M. 2022. Silicon enhances production and quality of blueberry fruits (*Vaccinium corymbosum* L.). Journal of Plant Nutrition. 45: 1563–1571.

Garg, N. and Bhandari, P. 2015. Silicon nutrition and mycorrhizal inoculations improve growth, nutrient status, K+ /Na+ ratio and yield of Cicer arietinum L. genotypes under salinity stress. Plant Growth Regulation. https ://doi.org/10.1007/s1072 5-015-0099- x.

Ghavamsaeidi Noghabi, S., Shahidi, A. and Homami, H. 2021. Estimation of Water Requirement and Crop Coefficient for Hemp at Different Growth Stages in Birjand Plain. Journal of Water Research in Agriculture, 34(4), 563-573. DOI: 10.22092/jwra.2021.122794.

Gholami, Y. and Falah, A. 2013. Effects of two different sources of silicon on dry matter production, yield and yield components of rice, Tarom Hashemi variety and 843 Lines. International Journal of Agriculture and Crop Sciences. (IJACS), 5(3), 227-231.

Hattori, T., Inanaga, S., Araki, H., An, P., Morita, S., Luxová, M. and Lux, A. 2005. Application of silicon enhanced drought tolerance in Sorghum bicolor. Plant Physiology. 123(4), 459-466.

Hidalgo-Santiago, L., Navarro-León, E., López-Moreno, F.J., Arjó, G., Gonzáles, L.M., Ruiz, J.M. and Blasco, B. 2021. The application of the silicon-based biostimulant Codasil® offset water deficit of lettuce plants. Scientia Horticulturae. 285, 110177.

Irfan, M., Maqsood, M.A., Rehman, H.u., Mahboob, W., Sarwar, N., Hafeez, O.B.A., Hussain, S., Ercisli, S., Akhtar, M. and Aziz, T. 2023. Silicon Nutrition in Plants under Water-Deficit Conditions: Overview and Prospects. Water. 15: 739. https://doi.org/10.3390/w15040739.

Jamali, S. and Sharifan, H. 2018. Investigation the effect of different Salinity levels on Yield and Yield components of Quinoa (Cv. Titicaca). Journal of Water and Soil Conservation. 25(2), 251-266. DOI: 10.22069/jwsc.2018.13721.2841.

Kaya, C., Tuna, L. and Higgs, D. 2006. Effect of silicon on plant growth and mineral nutrition of maize grown under water stress conditions. Journal of Plant Nutrition. 29(8), 1469-1480.

Khan, I., Awan, S.A. and Rizwan, M. 2023. Silicon: an essential element for plant nutrition and phytohormones signaling mechanism under stressful conditions. Plant Growth Regulation. 100: 301–319. https://doi.org/10.1007/s10725-022-00872-3.

Korndörfer, G. H. and Lepsch, I. 2001. Effect of silicon on plant growth and crop yield. Plant Science. 8: 133-147.

Kovács, S., Kutasy, E. and Csajbók, J. 2022. The Multiple Role of Silicon Nutrition in Alleviating Environmental Stresses in Sustainable Crop Production. Plants. 11, 1223. https://doi.org/10.3390/plants11091223.

Lemoine. R., La Camera, S., Atanassova, R., Dédaldéchamp, F., Allario, T., Pourtau, N., Bonnemain, J.L., Laloi, M., Coutos-Thévenot, P., Maurousset, L., Faucher, M., Girousse, C., Lemonnier, P., Parrilla, J. and Durand, M. 2013. Source-to-sink transport of sugar and regulation by environmental factors. Frontiers in Plant Science. 4:272. doi: 10.3389/fpls.2013.00272.

Lux, A., Luxová, M., Abe, J., Tanimoto, E., Hattori, T. and Inanaga, S. 2003. The dynamics of silicon deposition in the sorghum root endodermis. New Phytologist, 158(3): 437-441.

Ma, Y., Dias, M. C. and Freitas, H. 2020. Drought and Salinity Stress Responses and Microbe-Induced Tolerance in Plants. Frontiers in Plant Science. 11:591911. DOI: 10.3389/fpls.2020.591911

Merwad, A.R.M.A., Desoky, E.S.M. and Rady, M.M. 2018. Response of water deficit-stressed Vigna unguiculata performances to silicon, proline or methionine foliar application. Scientia Horticulturae. 228, 132–144.

Mousavi, S.M. 2022. Silicon and nano-silicon mediated heavy metal stress tolerance in plants- Book Chapter in: Silicon and Nano-silicon in Environmental Stress Management and Crop Quality Improvement: Progress and Prospects; (Edited by Etesami, H., Al Saeedi, A.H., El-Ramady, H., Fujita, M., Pessarakli, M., and Anwar Hossain, M.)- Elsevier publications.

Mukhtar, A., Asif, M. and Goyal, A. 2012. Silicon the non-essential beneficial plant nutrient to enhanced drought tolerance in wheat crop plant. In: Goyal A (ed).

Neu, S., Schaller, J. and Dudel, E.G. 2017. Silicon availability modifies nutrient use efficiency and content, C: N:P stoichiometry, and productivity of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). Scientific Reports. 7, 40829.

Ning, D., Qin, A., Liu, Z., Duan, A., Xiao, J., Zhang, J., Liu, Z., Zhao, B. and Liu, Z. 2020. Silicon-Mediated Physiological and Agronomic Responses of Maize to Drought Stress Imposed at the Vegetative and Reproductive Stages. Agronomy. 10, 1136.

Parveen, A., Mumtaz, S., Saleem, M.H., Hussain, I., Perveen, S. 2022. Chapter 11—Silicon and nanosilicon mediated heat stress tolerance in plants. In Silicon and Nano-Silicon in Environmental Stress Management and Crop Quality Improvement; Etesami, H., Al Saeedi, A.H., El-Ramady, H., Fujita, M., Pessarakli, M., Hossain, M.A., Eds.; Academic Press: Cambridge, MA, USA. 153–159.

Parviznia, F., Motesharezadeh, B., Mirseyed Hosseini, H. and Mousavi, S. M. 2021. Silicon Efficiency in Different zea maise Cultivars in a Calcareous Soil. Iranian Journal of Soil and Water Research. 52(5), 1275-1286. doi: 10.22059/ijswr.2021.317643.668875.

Ramírez-Olvera, S.M., Trejo-Téllez, L.I., Gómez-Merino, F.C., Ruíz-Posadas, L.D.M., Alcántar-González, E.G. and Saucedo-Veloz, C. 2021. Silicon Stimulates Plant Growth and Metabolism in Rice Plants under Conventional and Osmotic Stress Conditions. Plants (Basel). 15;10(4):777. doi: 10.3390/plants10040777.

Rea, R.S., Islam, M.R., Rahman, M.M., Nath, B. and Mix, K. 2022. Growth, Nutrient Accumulation, and Drought Tolerance in Crop Plants with Silicon Application: A Review. Sustainability. 14, 4525.

Rehman, M., Ilahi, H., Adnan, M., Wahid, F., Rehman, F., Ullah, A., Ullah, A., Zia, A. and Raza, M. A. 2021. Application of Silicon: A Useful Way to Mitigate Drought Stress: An Overview, Current Research in Agriculture and Farming. 2(2), 9-17. doi: http://dx.doi.org/10.18782/2582-7146.134.

Saud, S., Li, X., Chen, Y., Zhang, L., Fahad, S., Hussain, S. and Chen, Y. 2014. Silicon application increases drought tolerance of Kentucky bluegrass by improving plant water relations and morphophysiological functions. Journal of World Science. 2014:368694. doi: 10.1155/2014/368694.

Seleiman, M.F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., Dindaroglu, T., Abdul-Wajid, H.H. and Battaglia, M.L. 2021. Drought Stress Impacts on Plants and Different Approaches to Alleviate Its Adverse Effects. Plants. 10, 259.

Shammout, M.W., Qtaishat, T., Rawabdeh, H. and Shatanawi, M. 2018. Improving Water Use Efficiency under Deficit Irrigation in the Jordan Valley. Sustainability. 10, 4317.

Shen, X., Zhou, Y., Duan, L., Li, Z., Eneji, A. E. and Li, J. 2010. Silicon effects on photosynthesis and antioxidant parameters of soybean seedlings under drought and Ultraviolet-B radiation. Journal of Plant Physiology. 167(15), 1248-1252.

Singh, K., Singh, R., Singh, J. P., Singh, Y. and Singh, K. K. 2016. Effect of level and time of silicon application on growth, yield and its uptake by rice (*Oryza sativa*). The Indian Journal of Agricultural Sciences. 76(7): 410-413.

Terassi, D.S., Rezende, R., Wenneck, G.S., Menezes, C.S.L., Andrean, A.F.B.A., Villa e Vila, V. and Silva, L.H.M. 2021. Broccoli Production with Regulated Deficit Irrigation at Different Phenological Stages. Journal of Agricultural Science. 13, 71–80.

Villa e Vila, V., Marques, P.A.A., Rezende, R., Wenneck, G.S., Terassi, D.d.S., Andrean, A.F.B.A., Nocchi, R.C.d.F. and Matumoto-Pintro, P.T. Deficit Irrigation with Ascophyllum nodosum Extract Application as a Strategy to Increase Tomato Yield and Quality. Agronomy. 2023, 13, 1853.

Wahab, A., Abdi, G., Saleem, M.H., Ali, B., Ullah, S., Shah, W., Mumtaz, S., Yasin, G., Muresan, C.C. and Marc, R.A. 2022. Physio-Biochemical and Phyto-Hormonal Responses to Alleviate the Adverse Effects of Drought Stress: A Comprehensive Review. Plants (Basel). 21;11(13):1620. doi: 10.3390/plants11131620.

Waling, I., Van Vark, W., Houba, V. J. G. and Van der Lee, J. J. 1989. Soil and plant analysis, a series of syllabi, part 7. Plant Analysis Procedures, Wageningen Agriculture University.

Wang, M., Wang, R. and Mur, L.A.J. 2021. Functions of silicon in plant drought stress responses. Horticulture Research. 8, 254. https://doi.org/10.1038/s41438-021-00681-1.

White, B., Tubana, B. S., Babu, T., Mascagni, H., Agostinho, F., Datnoff, L. E. and Harrison, S. 2017. Effect of silicate slag application on wheat grown under two nitrogen rates. Plants. 6(4), 47.

Xie, Z., Song, F., Xu, H., Shao, H. and Song, R. 2014. Effects of Silicon on Photosynthetic Characteristics of Maize (*Zea mays* L.) on Alluvial Soil. The Scientific World Journal. 2014, 718716.

Zargar, S.M., Mahajan, R., Bhat, J.A., Nazir, M. and Deshmukh, R. 2019. Role of silicon in plant stress tolerance: opportunities to achieve a sustainable cropping system. Biotechnology. 9(3):73. doi: 10.1007/s13205-019-1613-z. Epub 2019 Feb 9.

Zhang, H. and Oweis, T. 1999. Water-yield relations and optimal irrigation scheduling of wheat in the Mediterranean region. Agricultural Water Management, 38(3), 195-211.

Zou, C., Li, Z. and Yu, D. 2010. Bacillus megaterium strain XTBG34 promotes plant growth by producing 2-pentylfuran. Journal of Microbiology. 48, 460–466. doi: 10.1007/s12275-010-0068-z.

Investigation of the Effect of Different Silicon Levels on Growth and Yield Characteristics of Quinoa Under Various Irrigation Regimes

Introduction: Quinoa, recognized for its high nutritional value and resilience to adverse environmental conditions, has garnered significant attention from researchers and farmers alike. However, water scarcity and drought remain major challenges in cultivating and producing this plant in arid and semi-arid regions. The use of mineral elements such as silicon, known for its positive effects on enhancing tolerance to environmental stress, improving plant growth, and optimizing performance under water-limited conditions, has been proposed as an effective strategy. In this context, investigating the impact of different silicon levels on the growth and yield characteristics of quinoa under various irrigation regimes can provide valuable insights into optimal water resource management and the use of supplemental nutrients to enhance agricultural productivity.

Materials and Methods: This study aimed to investigate the morpho-physiological and yield responses of quinoa to silicon fertilization under drought stress conditions at the research farm of Payame Noor University, Gandoman Center, located in Chaharmahal and Bakhtiari province during the 2023-2024 growing season. The experiment was conducted as a split-plot design within a randomized complete block design with three replications. Irrigation was applied at four levels in the main plots (40%, 60%, 80%, and 100% of field capacity), and silicon fertilization was applied at four levels (0, 1, 2, and 3 liters per hectare) in the subplots. To apply drought stress, field capacity was first determined. For this, a 2 × 2 m plot was prepared and filled completely with water. It was then covered with plastic to ensure full saturation of the soil. After 24 hours, when water in the larger soil pores was removed by gravity, the plastic was removed, and a soil sample was taken. The sample was weighed and then dried in an oven at 105°C for 24 hours. The sample was reweighed to calculate the evaporated moisture. The product Totale Silício®, manufactured by Fertiláqua in Brazil, was used as the source of silicon. This product contains 750 grams of SiO_2 and 45 grams of K_2O per liter, and is a liquid suspension with a density of 1.20 grams per liter. Silicon fertilizer was applied in liquid form according to the experimental treatments. Data analysis was performed using SAS software version 9.4, and means were compared using LSD test at the 5% significance level. Graphs were created using Excel software.

Results and Discussion: The results showed that the highest plant height (105.5 cm), 1000-seed weight (3.28 g), grain yield (1868 kg. ha^{-1}), and biological yield (4690 kg. ha^{-1}) were achieved with 100% field capacity and 3 liters per hectare of silicon. Additionally, the highest harvest index (52.1%) was observed with 60% field capacity and 1 liter of silicon, while the highest water use efficiency (1.14 $kg.m^3$) was recorded with 40% field capacity and 3 liters per hectare of silicon. In the 100% field capacity irrigation regime, the grain yield with 3 liters per hectare of silicon was 3%, 15%, and 49% higher compared to treatments with 2 liters, 1 liter, and no silicon, respectively. In the 40% field capacity irrigation regime, this increase for different silicon treatments compared to the maximum and minimum levels was 2%, 11%, and 89%, respectively. Furthermore, comparing grain yield between the 100% and 40% field capacity irrigation levels showed increases of 49%, 48%, 45%, and 90% for 0, 1, 2, and 3 liters of silicon per hectare, respectively. Silicon improved traits at all irrigation levels, but had a more positive effect on

leaf area index, number of seeds per panicle, and water use efficiency at the 40% irrigation level compared to the 100% field capacity irrigation treatment.

Conclusion: The results of this experiment generally indicated that water scarcity reduces growth characteristics, yield, and nutrient content in quinoa leaves. In contrast, silicon fertilization mitigated the negative effects of drought. At all irrigation levels, silicon fertilization improved various plant traits, particularly leaf area index, number of seeds per panicle, leaf phosphorus, leaf nitrogen, and water use efficiency. This improvement was more pronounced at the 40% field capacity irrigation level compared to the 100% field capacity irrigation treatment. Overall, while quinoa shows relative drought resistance, the best performance for this plant was observed under 100% field capacity irrigation with 3 liters per hectare of silicon. With the application of 3 liters of silicon per hectare, quinoa production has significantly increased, resulting in a net profit of 267,600,000 IRR higher compared to when silicon is not applied.

Keywords: *biological yield, morpho-physiological traits, panicle, Water use efficiency, yield index*

Author Contributions: 1 and 2: All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement: Data available on request from the authors.

Acknowledgements: The funding for this research was provided by the budget allocation for project No. 6190/09/11/D/400, approved by the Research Council of Payame Noor University, for which we hereby express our gratitude.

Ethical considerations: The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

ویراستاری نشده