Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Crop Production

Print ISSN: 2008- 739x
Online ISSN: 2008- 7403

Iranian Society of Agronomy and Plant Breeding Sciences

Effect of drought stress and different amounts of biochar on yield and yield components of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.)

Milad Mousavi[1*], Reza Tavakol Afshari[2]

[1] Correspond author; Ph.D. student of Crop Physiology, Agrotechnology Department, Agriculture Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, Email: mi.mousavi@mail.um.ac.ir

[2] Professor, Agrotechnology Department, Agriculture Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Iran, Email: tavakolafshari@um.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 2025-01-11
Accepted: 2025-04-12

Keywords:
Deficit irrigation
Flowering
Grain weight
Grain protein
Pistachio Shell

ABSTRACT

Background and Objectives: Water scarcity and recurrent drought pose significant challenges to agriculture in arid and semi-arid regions. Utilizing resilient crops, such as quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.), and soil amendments like biochar are effective strategies to sustain agricultural productivity. Quinoa, known for its drought and salinity tolerance and high nutritional value, is a strategic crop for such regions. Additionally, biochar, as a soil amendment, improves soil physical and chemical properties, water retention, and mitigates the effects of deficit irrigation. This study aimed to investigate the effects of pistachio shell biochar and deficit irrigation at different growth stages on yield, yield components, and grain quality of quinoa.

Materials and Methods: This experiment was conducted in a factorial arrangement within a completely randomized design with four replications at the Ferdowsi University of Mashhad research greenhouse in 2022. Treatments included five irrigation levels (full irrigation and 50% field capacity during vegetative, flowering, grain filling, and the entire growth period) and three biochar levels (0, 10, and 20 t ha^{-1}). Parameters such as plant height, grain weight per pot, biological weight per pot, thousand-grain weight, and grain quality traits (protein, oil, and ash content) were measured.

Results: Full-season deficit irrigation reduced grain weight per pot by 60% and plant height by 25.9%. Yield reductions at deficit irrigation during vegetative, flowering, and grain filling stages were 14.5%, 25.3%, and 17.8%, respectively. Additionally, plant height decreased by 11.7% and 23.5% at deficit irrigation during flowering and grain filling stages, respectively. Biochar application mitigated these negative effects, increasing plant height by 18.7% and 23.5% at 10 and 20 t ha^{-1}, respectively. In addition to improving height, biochar application also significantly increased grain weight per pot by 28.8% and 54.8% at 10 and 20 t ha^{-1}. Also, 10 and 20 t ha^{-1} of biochar resulted in an increase of 7.9% and 2.6% (grain protein) and 20.8% and 7.3% (grain oil). Correlation analysis revealed strong positive relationships between grain weight per pot with biological weight per pot (r=0.87), grain oil (r=0.69) and ash content (r=0.66).

Conclusion: Pistachio shell biochar effectively reduced the negative effects of deficit irrigation on plant height, yield, and grain quality. The improvement in grain weight and quality of quinoa highlights biochar's potential as a sustainable strategy for water resource management and crop production under drought conditions. Further research is recommended to explore the long-term and field-scale impacts of biochar on soil properties and quinoa growth in arid regions.

Cite this article: Mousavi, M., Tavakol Afshari, R. 2025. Effect of drought stress and different amounts of biochar on yield and yield components of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Crop Production Journal*, 18 (1), 91-112.

© The Author(s).
DOI: 10.22069/ejcp.2025.23192.2660
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

تولید گیاهان زراعی
شاپا چاپی: ۷۳۹x-۲۰۰۸
شاپا الکترونیکی: ۷٤۰۳-۲۰۰۸

اثر کم‌آبیاری و مقادیر مختلف بیوچار بر عملکرد و اجزای عملکرد کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd.)

سیدمیلاد موسوی[1*]، رضا توکل‌افشاری[2]

[1] نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری فیزیولوژی گیاهان‌زراعی، گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران، رایانامه: mi.mousavi@mail.um.ac.ir

[2] استاد گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران، رایانامه: tavakolafshari@um.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱٤۰۳/۱۰/۲۲
تاریخ پذیرش: ۱٤۰٤/۱/۲٤

واژه‌های کلیدی:
پوست پسته
کم‌آبیاری
وزن دانه
گلدهی
پروتئین دانه

چکیده

سابقه و هدف: کمبود آب و خشکسالی‌های متناوب از مهم‌ترین چالش‌های کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. در چنین شرایطی، استفاده از گیاهان مقاوم به کم‌آبی مانند کینوا و اصلاح‌کننده‌های خاک، مانند بیوچار، استراتژی‌های موثری برای بهره‌وری پایدار در کشاورزی است. کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd.)، که به مقاومت بالا در برابر خشکی و شوری و ارزش غذایی بالا شناخته می‌شود، محصول استراتژیکی برای کشت در این مناطق است. ازسوی دیگر بیوچار، به‌عنوان یک اصلاح‌کننده خاک، که خصوصیات فیزیکی و شیمیایی و ظرفیت نگهداری آب در خاک را بهبود می‌بخشد، اثرات کم‌آبی را کاهش می‌دهد. هدف این پژوهش، بررسی تأثیر بیوچار پوست پسته و کم‌آبیاری در مراحل مختلف رشد بر عملکرد، اجزای عملکرد و کیفیت دانه کینوا بود.

مواد و روش‌ها: این پژوهش به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار در سال ۱٤۰۱ در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد اجرا شد. تیمارها شامل پنج سطح کم‌آبیاری (ظرفیت زراعی کامل، کاهش ۵۰ درصد ظرفیت زراعی در مراحل رویشی، گلدهی، دانه‌بستن و کل دوره رشد) و سه سطح بیوچار (صفر، ۱۰ و ۲۰ تن در هکتار) بودند. شاخص‌های مورد ارزیابی شامل ارتفاع بوته، وزن دانه در گلدان، وزن بیولوژیک در گلدان، وزن هزار دانه و ویژگی‌های کیفی دانه (محتوای پروتئین، روغن و خاکستر) بود.

یافته‌ها: کم‌آبیاری در کل دوره رشد باعث کاهش ٦۰ درصدی وزن دانه در گلدان و کاهش ۲۵/۹ درصدی ارتفاع گیاه شد. کاهش وزن دانه در گلدان در تیمارهای کم‌آبیاری در مراحل رویشی، گلدهی و دانه‌بستن به‌ترتیب ۱٤/۵، ۲۵/۳ و ۱۷/۸ درصد بود. همچنین، کم‌آبیاری در مراحل گلدهی و دانه‌بستن به‌ترتیب موجب کاهش ۱۱/۷ و ٦/۵ درصدی ارتفاع گیاه شد. استفاده از بیوچار اثرات منفی کم‌آبیاری را تعدیل کرد؛ به‌طوری‌که کاربرد ۱۰ و ۲۰ تن بیوچار در هکتار به‌ترتیب باعث افزایش ارتفاع گیاه به میزان ۱۸/۷ و ۲۳/۵ درصد نسبت به تیمار بدون بیوچار شد. کاربرد بیوچار علاوه بر بهبود ارتفاع، وزن دانه در گلدان را نیز به‌طور معناداری

افزایش داد و موجب افزایش ۲۸/۸ و ٥٤/۸ درصدی در مقادیر ۱۰ و ۲۰ تن در هکتار شد. همچنین، ۱۰ و ۲۰ تن در هکتار بیوچار منجر به افزایش ۷/۹ و ۲/٦ درصد پروتئین دانه، ۲۰/۸ و ۷/۳ درصد روغن دانه شد. تحلیل همبستگی نشان داد که وزن دانه در گلدان رابطه مثبت و معناداری با وزن بیولوژیک در گلدان (r=0.87)، روغن دانه (r=0.69) و خاکستر دانه (r=0.66) دارد.

نتیجه‌گیری: بیوچار پوست پسته توانست اثرات منفی کم‌آبیاری بر ارتفاع، عملکرد و کیفیت دانه کینوا را به‌طور معنی‌داری کاهش دهد. بهبود وزن و کیفیت دانه‌های کینوا، نشان‌دهنده پتانسیل بالای بیوچار به‌عنوان راهکاری پایدار برای مدیریت منابع آبی و افزایش تولید در شرایط تنش آبی است. پیشنهاد می‌شود که تحقیقات بیشتری در زمینه اثرات بلندمدت و مزرعه‌ای بیوچار بر خصوصیات خاک و رشد کینوا در مناطق خشک انجام شود.

استناد: موسوی، سیدمیلاد؛ توکل‌افشاری، رضا. (۱٤۰٤). اثر کم‌آبیاری و مقادیر مختلف بیوچار بر عملکرد و اجزای عملکرد کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd.). *مجله تولید گیاهان زراعی*، ۱۸ (۱)، ۱۱۲-۹۱.

DOI: 10.22069/ejcp.2025.23192.2660

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

© نویسندگان.

مقدمه

تغییرات در میزان بارندگی، به‌ویژه نوسانات آن، برخلاف صرفاً مقدار باران، عامل بسیار مهمی در تأثیرگذاری بر بهره‌وری کشاورزی در مناطق خشک محسوب می‌شود. مرور بیش از چهل سال تحقیقات نشان می‌دهد که تغییر در مقدار و زمان‌بندی بارش می‌تواند به‌شدت بر سطح رطوبت خاک تأثیر بگذارد؛ عاملی که برای کشت موفق محصولات بسیار حیاتی است (۱, ۲). این تغییرات می‌توانند به دوره‌های خشکسالی طولانی‌تری منجر شوند و چالش‌های پیش‌روی کشاورزان در مناطق کم‌آب را تشدید کنند (۳). این موضوع به‌قدری مهم است که اخیرا در ایران پژوهشی با هدف پیداکردن بهترین منطقه برای کشت محصولات زراعی جهت بهبود عملکرد با بررسی مهمترین پارامترهای اقلیمی انجام شده است (٤).

برآورد روند بلندمدت تغییرات ذخایر آب زیرزمینی در ایران بین سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۷ نشان می‌دهد که کاهش شدید و نگران‌کننده‌ای در بسیاری از مناطق رخ داده است، به‌طوری‌که در برخی مناطق این کاهش به حدود ٤٤۰۰ میلیون متر مکعب رسیده است. این برآوردها بیانگر تغییرات اقلیمی و برداشت بیش‌ازحد سفره‌های آب زیرزمینی برای مصارف کشاورزی در برخی مناطق ایران هستند (۵). با توجه به محدودیت این منبع مهم و حیاتی و وجود خشکسالی‌های متناوب در کشور (٦)، یافتن راهکارهایی جهت غلبه بر کمبود آب، همواره از اولویت‌های مطالعاتی و پژوهشی بوده است تا بتوان محصولات کشاورزی را برای جمعیت رو به ازدیاد تولید نمود.

کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd.) گیاهی یکساله متعلق به جنس *Chenopodium* و خانواده *Amaranthaceae* است (۷). منشاء این گیاه شیلی، پرو، بولیوی، کلمبیا، اکوادور است و در اروپا، آسیا و آفریقا نیز کشت می‌شود و در شرایط خاک فقیر، کمبود آب و شوری بالا نیز محصول تولید می‌کند (۸). با اینکه بهترین دمای رشد کینوا ۲۷-۲۵ درجه سانتی‌گراد است ولی ٤- تا ۳۵ درجه را تحمل می‌کند . کینوا از آنجا که گیاهی دارویی و بدون گلوتن است؛ غذایی ارزشمند بوده و به سلامت جامعه نیز کمک خواهد نمود. عملکرد کینوا با کاربرد تنها نصف آب آبیاری مورد نیاز برای آبیاری کامل می‌تواند بین ۲-۱/۲ تن در هکتار پایدار شود. همچنین گزارش شده است که حداکثر عملکرد دانه کینوا تحت آبیاری کامل معادل ۲/۰٤ تن در هکتار، تحت کم آبیاری ۲/۰۱ تن در هکتار و در شرایط دیم بطور میانگین معادل ۱/٦۸ تن در هکتار می‌باشد. این در حالی است که کارایی مصرف آب (WUE) تحت تیمار کم‌آبیاری و دیم بطور معنی‌داری بالاتر از تیمار آبیاری کامل است؛ اما کارایی مصرف آب بین تیمار کم‌آبیاری و دیم تفاوت چندانی ندارد (۹). کاهش ۷۰ درصد آبیاری کامل تنها منجر به کاهش ۳٦ درصد عملکرد دانه می‌شود، درحالیکه کارایی مصرف آب در دانه ۱۲ درصد افزایش می‌یابد (۱۰). بررسی ژنوتیپ‌های مختلف کینوا در ایران طی سال‌های گذشته، سازگاری این گیاه همراه با عملکرد قابل‌قبول و پایدار و نقش آن در امنیت غذایی را نشان داده است (۱۱، ۱۲، ۱۳). تحقیقات اندکی بر روی کینوا رقم ساجاما[1] انجام شده است؛ اما بر اساس مطالعات انجام شده، بذر کینوا رقم ساجاما در دامنه دمایی گسترده‌ای جوانه می‌زند (۱٤) ولی بالاترین میزان جوانه‌زنی در ۲۵ درجه سانتی‌گراد اتفاق می‌افتد (۱۵). از طرفی این رقم سازگاری بالایی به خشکی و شوری نشان داده است (۱٦، ۱۷، ۱۸). مدیریت منابع آب به روش های مختلف می‌تواند کارایی مصرف آب را بهبود بخشد. یکی از این راهکارها بیوچار می‌باشد. بیوچار به‌عنوان یک

[1] Sajama

اصلاح‌کننده خاک، نقش قابل توجهی در کاهش اثرات تنش خشکی در گیاه کینوا داشته است (۱۹).

پژوهش‌ها نشان داده‌اند که بیوچار با حفظ و آزادسازی رطوبت، به‌ویژه در مناطق خشک، می‌تواند به بهبود شرایط رشد گیاه کمک کند (۲۰). این ماده علاوه بر افزایش باروری خاک، به‌عنوان یک راهکار مؤثر در ترسیب کربن و کاهش گازهای گلخانه‌ای مورد توجه قرار گرفته است (۲۱). بیوچار، که ترکیبی آلی و بسیار پایدار است، ظرفیت نگهداری آب در خاک را بهبود می‌بخشد (۲۲). عناصر معدنی موجود در بیوچار، به‌جز نیتروژن، عمدتاً در خاکستر آن یافت می‌شوند و نیتروژن موجود به‌ندرت به‌صورت قابل استفاده برای گیاهان آزاد می‌شود (۲۳). با این حال، کاربرد بیوچار در مزارع کینوا توانسته است رشد، تحمل به خشکی، میزان نیتروژن برگ و کارایی مصرف آب را بهبود بخشد (۲٤). علاوه بر این، بیوچار باعث کاهش انتشار گاز دی‌نیتروژن اکسید از خاک می‌شود و اثرات منفی ناشی از کم‌آبیاری (۲۵)، شوری (۲٦) و اثرات توام خشکی و شوری (۲۷, ۲۸) را بر ویژگی‌های فیزیولوژیک، بیوشیمیایی و عملکرد کینوا کاهش می‌دهد. کاربرد بیوچار در خاک‌های شنی، علاوه بر بهبود تولید محصول، می‌تواند استراتژی‌ای برد-برد برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و افزایش ترسیب کربن ارائه دهد. به‌طور مشابه، استفاده از بیوچار تولید شده از پوست و بقایای پسته باعث بهبود کیفیت کاهو (۲۹)، افزایش رشد و بهره‌وری آب در کشت ذرت (۳۰) و توسعه رشد گلرنگ (۳۱) شد. بااین‌حال تاکنون از بیوچار پوست پسته برای کاهش اثرات کم‌آبیاری بر رشد کینوا استفاده نشده است. با توجه به مطالب فوق این تحقیق با هدف بررسی پاسخ عملکردی گیاه کینوا تحت تأثیر کم‌آبیاری در مراحل مختلف رشد به مقادیر مختلف بیوچار پوست پسته انجام شد.

مواد و روش‌ها

این مطالعه در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد در سال ۱٤۰۱ به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با ٤ تکرار انجام شد. بذر کینوا رقم ساجاما از مؤسسهٔ تحقیقات اصلاح و تهیهٔ بذر و نهال کرج تهیه شد. بر اساس سیستم مقیاسی مؤسسه فدرال زیست‌شناسی، اداره فدرال گونه‌ها و صنایع شیمیایی (BBCH[1]) مراحل رشدی کینوا در ۹ مرحله معرفی شده است که شامل مرحله صفر (جوانه زنی): آبنوشی بذر تا ظهور لپه‌ها، مرحله یک (توسعه برگ): لپه‌های کاملاً ظهوریافته تا ۹ جفت برگ قابل رویت، مرحله دو (تشکیل ساقه‌های جانبی): رویت جوانه‌های جانبی تا ۹ ساقه جانبی قابل رویت، مرحله سه (طویل شدن ساقه)، مرحله چهار (توسعه بخش‌های رویشی قابل برداشت)، مرحله پنج (ظهور گل‌آذین): گل آذین پوشانده شده با برگ‌ها تا ظهور گل‌آذین با گل‌های همچنان بسته، مرحله شش (گلدهی): شروع تا اتمام گرده‌افشانی، مرحله هفت (توسعه میوه): تشکیل میوه، مرحله هشت (رسیدگی): دانه شیری تا دانه سخت و خشک به رنگ قرمز تا تیره، مرحله نه (پیری): تنها پیری برگ‌های پایین تا برداشت محصول است (۳۲). فاکتورهای آزمایش شامل تیمار کم‌آبیاری شامل ۵ سطح: شاهد (ظرفیت زراعی در کل دوره رشد)، ۵۰ درصد ظرفیت زراعی در دوره رشد رویشی (از ٦ برگی در محله یک تا مرحله چهار)، ۵۰ درصد ظرفیت زراعی در دوره گلدهی (مرحله پنج و شش)، ۵۰ درصد ظرفیت زراعی در دوره تشکیل و پر شدن دانه (مرحله هفت و هشت) و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی در کل دوره رشد گیاه و فاکتور بیوچار شامل ۳ سطح: (۰، ۳۵ و ۷۰ گرم در هر گلدان معادل ۰، ۱۰ و ۲۰ تن در هکتار بیوچار)

[1] Biologische Bundesanstalt Bundessortenamt und Chemische Industrie

بود (۳۳، ۳٤، ۳۵، ۳٦). مقدار ۵ کیلوگرم پوست پسته تهیه شده از باغات پسته در شهر کرمان به روش پیرولیز کند در کوره تحت دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳ ساعت حرارت داده شد و بیوچار مورد نظر تهیه شد (۳۷). بطور خلاصه در پیرولیز کند به فرایند کربنیزه کردن زیست‌توده در یک بازه دمایی گسترده (۳۰۰ تا ۸۰۰ درجه سلسیوس) با نرخ گرمایش پایین (۵ تا ۷ درجه در دقیقه) و زمان ماندگاری طولانی بخار (معمولاً بیش از یک ساعت) گفته می‌شود. در این فرآیند، محصول اصلی بیوچار است. در طول پیرولیز، زیست‌توده در محیط بدون اکسیژن تا دمایی بالاتر از ۳۰۰ درجه حرارت داده می‌شود؛ ترکیبات آلی به‌صورت حرارتی تجزیه شده و فاز بخار آزاد می‌شود، در حالی که بیوچار به‌عنوان فاز جامد باقی می‌ماند. فاز بخار پس از آن سرد می‌شود تا روغن زیستی تولید شود؛ در این مرحله، ترکیبات قطبی و با وزن مولکولی بالا تغلیظ می‌شوند، در حالی که ترکیبات فرار با وزن مولکولی پایین (مانند CO، H_2، CH_4 و C_2H_2) در فاز گازی باقی می‌مانند (۳۸). خصوصیات بیوچار در جدول ۱ آورده شد. با توجه به اینکه تحقیق حاضر بر پایه‌ی کشت گلدانی بوده در ابتدا ٦۰ گلدان به قطر ۲۰ و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر که دارای تهویه انتهایی بودند، تهیه گردید. خاک مورد نیاز پس از الک کردن با الک ٤ میلی‌متری، به نسبت ۲ به ۱ ماسه به خاک مخلوط شد. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۱- خصوصیات بیوچار پوست پسته

Table 1. Properties of pistachio shell biochar

اسیدیته	نیتروژن	فسفر	پتاسیم	کربن آلی	هدایت الکتریکی
$pH_{1:5}$	Nitrogen ($mg.kg^{-1}$)	Phosphorus($mg.kg^{-1}$)	Potassium($mg.kg^{-1}$)	OC(%)	$EC_{1:5}$ ($dS.m^{-1}$)
9.1	9500	558.8	980	18.2	4.36

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

Table 2. Physical and chemical properties of the soil

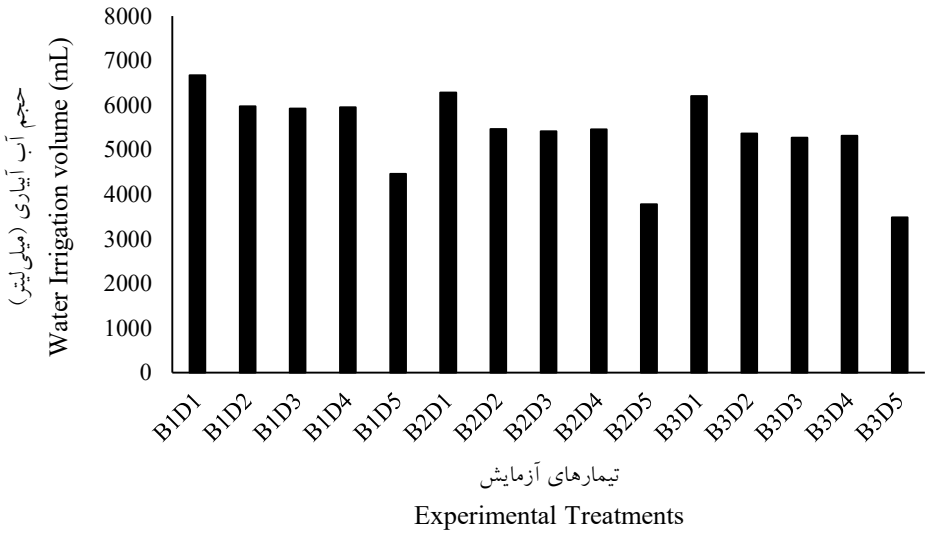
بافت خاک	نیتروژن	فسفر	پتاسیم	کربن آلی	آهک	هدایت الکتریکی	اسیدیته	ظرفیت زراعی
Soil texture	N ($mg.kg^{-1}$)	P ($mg.kg^{-1}$)	K ($mg.kg^{-1}$)	Organic carbon (%)		EC ($ds.m^{-1}$)	pH	FC (%)
لوم شنی sandy loam	500	3.1	160	0.37	14	2.5	7.65	15

در ابتدا گلدان‌ها توزین و تا وزن ٦ کیلوگرم با خاک مرکب پر شدند. لازم به ذکر است ابتدا در کف گلدان‌ها به صورت یکسان یک لایه ۲-۱ سانتی‌متری سنگ‌ریزه به عنوان فیلتر جهت بهبود زهکشی و تهویه قرار داده شد و ۵ سانتی‌متر بالای گلدان‌ها به‌منظور اعمال آبیاری، خالی در نظر گرفته شد. از آنجایی‌که بذرهای کینوا کوچک هستند و برای جلوگیری از جابجایی بذرها، ابتدا خاک گلدان را بصورت اشباع آبیاری شد. پس از ٤۸ ساعت میزان آب خاک در حد ظرفیت زراعی رسید و سپس کشت بذر در عمق ۲ سانتی‌متری خاک انجام گرفت. پس از اینکه بذور کشت شده در گلدان‌ها جوانه زدند و به مرحله ٦ برگی رسیدند به منظور یکسان کردن تعداد بوته‌ها، در هر گلدان تراکم بوته‌ها به سه عدد کاهش یافت، به گونه‌ای که بوته‌ها از دیواره گلدان‌ها فاصله داشتند. اعمال تیمارهای رژیم آبی به روش وزنی انجام شد

(۳۹). ابتدا کف گلدان‌ها به مقدار مساوی سنگ‌ریزه ریخته و هر گلدان با ٦ کیلوگرم خاک پر شد. خاک با افزودن آب به اشباع رسیده و پس از زهکشی آب اضافی و ثابت شدن وزن گلدان‌ها، خاک به ظرفیت زراعی رسید. وزن گلدان‌ها در این مرحله ثبت و خاک به مدت ٤۸ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک گردید. سپس با استفاده از معادله (۱) ظرفیت زراعی خاک بصورت وزنی تعیین شد.

معادله (۱)
$$\text{ظرفیت زراعی}\ (\%) = \frac{\text{میزان رطوبت}\ (\text{گرم})}{\text{وزن خاک خشک}\ (\text{گرم})}$$

گیاهان تا مرحله ٦ برگی بخوبی آبیاری شدند و اعمال تیمارهای آبیاری بعد از تنک کردن گیاهان انجام شد. برای اعمال تیمارهای آبیاری در طول فصل رشد از دستگاه TDR (Time Domain Reflectometer) استفاده شد که رطوبت خاک را بصورت حجمی اندازه‌گیری می‌کند. TDR یک روش مطمئن برای اندازه‌گیری ویژگی‌های الکتریکی مواد مختلف، از جمله خاک‌هاست (٤۰، ٤۱). در این روش، یک موج الکترومغناطیسی از طریق یک کابل مخصوص به دورن ماده فرستاده می‌شود و سپس بازتاب آن بررسی می‌شود (٤۲، ٤۳). زمانی‌که دستگاه TDR یک پالس ولتاژ سریع را دورن کابل کواکسیال یا موجبَر قرارگرفته در ماده می‌فرستد، این موج با خواص الکتریکی ماده برخورد می‌کند. هرگونه تغییر در جنس یا ساختار ماده باعث بازتاب بخشی از موج می‌شود. با تحلیل این بازتاب‌ها، می‌توان اطلاعات دقیقی درباره ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی ماده به‌دست آورد (٤٤، ٤٥). با فشار دادن کلید Power دستگاه TDR روشن می‌شود و نوک TDR که دارای سنسور است را درون خاک فرو برده و پس از چند ثانیه میزان رطوبت حجمی در عمقی که نوک آن قرار دارد روی نمایشگر، نمایش داده می‌شود. میزان رطوبت ظرفیت زراعی حجمی معادل ۲۱ درصد بود. آبیاری اولیه برای کشت به اندازه ۱۵۰۰ میلی‌لیتر انجام شد. بصورت میانگین فقط ۱۰۰۰ میلی‌لیتر آن در گلدان‌ها باقی ماند و مابقی رطوبت از کف گلدان‌ها خارج شد. ۲۱ روز پس از آبیاری اول، دومین آبیاری برای تمام تیمارها اعمال شد و میزان کاهش رطوبت هر دو روز یکبار بررسی شد. به‌دلیل اینکه میزان کاهش رطوبت به‌خصوص در شرایط کنترل، بالا بود در ادامه آزمایش هر ۳ روز یکبار رطوبت گلدان‌ها اندازه‌گیری و به اندازه کاهش رطوبت نسبت تیمار موردنظر آبیاری انجام شد. تعداد آبیاری برای تمام تیمارها ۳۱ مرتبه بود و مجموع آبیاری برای هر تیمار در شکل ۱ گزارش شد. با توجه به عمق کم گلدان‌ها (۲۰ سانتی‌متر) و امکان بالای آبشویی عناصر از خاک و برای جلوگیری از مواجه گیاه کینوا با کمبود عناصر از کود NPK با نسبت ۲۰:۲۰:۲۰ با غلظت ۲ در هزار در ۲ مرحله ٦ برگی و ۱۲ برگی استفاده شد. همچنین برای مبارزه با آفات، طی دو مرحله سم‌پاشی با حشره‌کش استامی‌پراید ۲۰ درصد با غلظت ۲ در هزار انجام شد. هیچ گونه بیماری در این طرح مشاهده نشد. کاشت و برداشت به‌ترتیب در تاریخ یک فروردین و نه مرداد ۱٤۰۱ انجام شد و کل دوره رشد از کاشت تا برداشت ۱۳۳ روز بود.



شکل ۱- مجموع حجم آب آبیاری برای هر تیمار. شاهد (D1)، کم‌آبیاری در مرحله رویشی (D2)، مرحله گلدهی (D3)، مرحله پرشدن دانه (D4)، کم‌آبیاری در کل فصل رشد (D5)؛ بدون بیوچار (B1)، ۱۰ تن در هکتار بیوچار (B2) و ۲۰ تن در هکتار بیوچار (B3).

Figure 1. Volume of irrigation water applied for each treatment. D1: control (D1), deficit irrigation in vegetative stage (D2), flowering stage (D3), grain filling stage (D4), Full-season deficit irrigation (D5); non-biochar (B1), 10 $t.ha^{-1}$ (B2), 20 $t.ha^{-1}$ (B3) biochar.

جدول ۳- تجزیه واریانس شاخص‌های عملکرد کمی و کیفی گیاه کینوا تحت تأثیر کم‌آبیاری و بیوچار پوست پسته.

Table 3. Analysis of variance of yield and physiological Indicators quinoa under deficit irrigation and pistachio shell biochar**.**

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی Degree of freedom	Mean Square میانگین مربعات							
		ارتفاع Height	وزن دانه در گلدان Grain weight per pot	وزن بیولوژیک در گلدان Biological weight per pot	شاخص برداشت Harvest index	وزن هزار دانه 1000kernel weight	پروتئین Protein	روغن Fat	خاکستر Ash
کم‌آبیاری Deficit irrigation	4	298.51**	87.7**	1727.13**	259.9**	0.76**	3.82**	2.018**	0.91**
بیوچار Biochar	2	540.84**	77.89**	1163.1**	2.64ns	0.42**	5.32**	3.286**	0.32**
کم‌آبیاری× بیوچار Deficit irrigation × Biochar	8	58.68**	3.82 ns	56.04**	39.05ns	0.02 ns	0.156ns	0.042ns	0.026ns
خطا Error	45	10.6	1.88	16.5	49.7	0.03	0.22	0.09	0.03
ضریب تغییرات Coefficient of variation		7.6	14.87	11.87	24.75	5.71	3.58	7.15	6.17

**، * و ns: به‌ترتیب معنی‌دار در سطح ۱، ۵ و غیرمعنی‌دار

**, *, and ns shows significant at 1%, 5%, and non-significant

اندازه‌گیری خصوصیات کیفی بذر: به منظور اندازه‌گیری میزان خاکستر از روش AOAC[1] (۱۹۹۸) به شماره ۹٦۸/۰۸ و پروتئین از روش AACC[2] به شماره ٤٤/۰۲-۱۵ استفاده شد (٤٦، ٤۷)، که در این فرآیند، ضریب تبدیل نیتروژن ٦/۲۵ مورد استفاده قرار گرفت. برای تعیین میزان روغن دانه، ابتدا ۱۰ گرم از دانه آسیاب شده و سپس ۰/۳ گرم از آن در داخل کارتریج دستگاه سوکسله قرار داده شد (model SOX-406, South Korea). به هر نمونه حدود ۲۵۰ میلی‌لیتر حلال پترولیوم اتر اضافه شد. نمونه‌ها به مدت ٦ ساعت در دستگاه سوکسله قرار گرفتند و پس از این مدت زمان، روغن استخراج شده از نمونه جدا و وزن‌کشی شد. در مرحله برداشت که معیار آن رسیدگی فیزیولوژیک بود، خصوصیات عملکرد و اجزای عملکرد شامل ارتفاع، وزن دانه در گلدان، وزن بیولوژیک در گلدان، شاخص برداشت و وزن هزار دانه اندازه‌گیری شدند.

آنالیز آماری

آنالیز واریانس دوطرفه برای تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها انجام شد. سپس مقایسه میانگین‌ها برای هر صفت و بر اساس روش حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) و در سطح احتمال ۵ درصد با نرم افزار SAS. Ver. 9.4 انجام گرفت. رسم نمودارها و جداول با استفاده از نرم‌افزار Excel 2013 صورت گرفت. آنالیز همبستگی صفات کمی و کیفی کینوا با استفاده از پکیج psych و متد پیرسون در نرم‌افزار R نسخه 4.3.2 انجام شد.

نتایج و بحث

خلاصه نتایج تجزیه واریانس مربوط به صفات عملکرد و اجزای عملکرد (ارتفاع، وزن دانه در گلدان در گلدان، وزن بیولوژیک در گلدان، شاخص برداشت و وزن هزار دانه) در جدول ۳ نشان داده شده است.

ارتفاع بوته: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر کم‌آبیاری، بیوچار و اثر متقابل آن‌ها بر ارتفاع بوته در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). کم‌آبیاری در مرحله رویشی، گلدهی، دانه‌بستن و کل دوره رشد به‌ترتیب ارتفاع گیاه را ۲۱/۹، ۱۱/۷، ٦/۵ و ۲۵/۹ درصد کاهش داد درحالیکه که مقادیر بیوچار ۱۰ و ۲۰ تن در هکتار در مقایسه با تیمار بدون بیوچار منجر به افزایش ۱۸/۷ و ۳۰/٦ درصدی در ارتفاع گیاه شد (جدول ٤). به‌طورکلی، افزایش میزان بیوچار در تمام تیمارهای کم‌آبیاری، اثرات خشکی را کاهش می‌دهد (شکل ۲-A) و متعاقبا باعث افزایش ارتفاع گیاه می‌شود (٤۸، ٤۹). این کاهش معنی‌دار ارتفاع گیاه کینوا تحت تأثیر خشکی با بسیاری از مطالعات دیگر مطابقت دارد (۵۰، ۵۱، ۵۲، ۵۳). کاهش ارتفاع به علت اختلال در فتوسنتز و کاهش مواد فتوسنتزی قابل دسترس برای رشد گیاه است (۵٤). بیوچار با بهبود خصوصیات فیزیکی-شیمیایی خاک همچون pH و ظرفیت تبادل کاتیونی، دسترسی به عناصر غذایی را افزایش می‌دهد (۵۵، ۵٦، ۵۷) و با افزایش فراهمی عناصری مثل نیتروژن در خاک، می‌تواند به افزایش ارتفاع گیاه کمک کند (۵۸، ۵۹).

[1] Association of Analytical Chemists

[2] American Association of Cereal Chemists

جدول ٤- مقایسه میانگین اثرات کم‌آبیاری در مراحل مختلف رشدی و سطوح مختلف بیوچار بر عملکرد کمی و کیفی کینوا.

Table 4. Mean comparison of effects of deficit irrigation in different growth stage and different content of biochar on quantity and quality of quinoa yield.

تیمار Treatment	وزن دانه در گلدان (گرم) Grain weight per pot (g)	وزن ۱۰۰۰ دانه (گرم) 1000 grain weight (g)	شاخص برداشت (درصد) Harvest index (%)	خاکستر (درصد) Ash (%)	پروتئین (درصد) Protein (%)	چربی (درصد) Fat (%)
شاهد Control	12.06a	3.34a	26.72bc	3.01a	12.54c	4.64a
کم‌آبیاری در مرحله رویشی deficit irrigation in vegetative stage	10.31b	3.17b	30.84ab	3.03a	12.84c	4.57a
کم‌آبیاری در مرحله گلدهی deficit irrigation in flowering	9.01c	3.19b	23.42c	2.78b	13.34b	4.22b
کم‌آبیاری در مرحله پرشدن دانه deficit irrigation in grain filling stage	9.91bc	2.86c	24.37c	2.59c	13.66ab	3.95c
کم‌آبیاری در کل دوره رشد full season deficit irrigation	4.81d	2.73c	35.48a	2.39d	13.9a	3.67d
بدون بیوچار non-biochar	7.21c	2.9c	28.38a	2.7b	12.81c	3.85a
۱۰ تن در هکتار بیوچار 10 $t.ha^{-1}$ biochar	9.29b	3.07b	27.6a	2.68b	13.14b	4.13b
۲۰ تن در هکتار بیوچار 20 $t.ha^{-1}$ biochar	11.16a	3.19a	28.5a	2.9a	13.82a	4.65c

حروف مشترک در هر ستون نشان دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد است.

Same letters in each column indicate no significant difference at 5 % probability level.

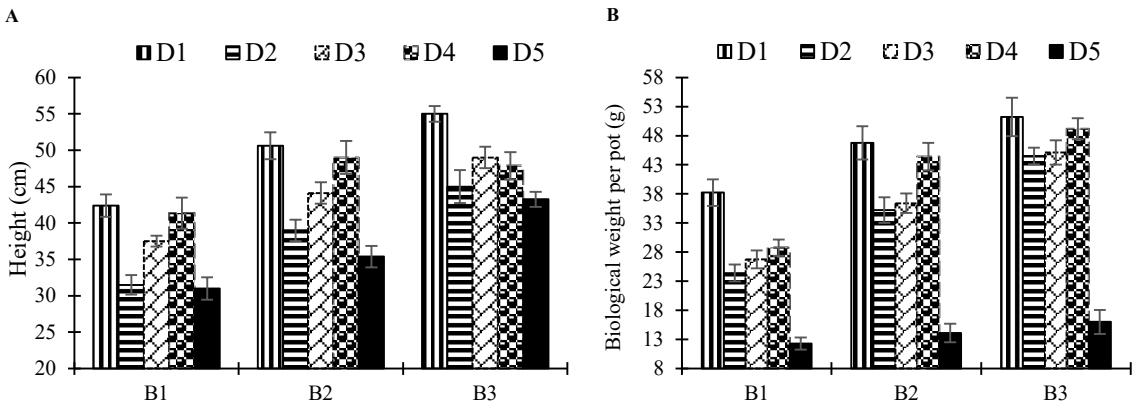
وزن بیولوژیک در گلدان: اثر کم‌آبیاری، بیوچار و اثر متقابل آن‌ها بر وزن بیولوژیک در گلدان در سطح احتمال یک درصد دارای اختلاف معنی‌داری بودند (جدول ۳). بیشترین مقدار کاهش وزن بیولوژیک در گلدان مربوط به کم‌آبیاری در کل دوره رشد بود که باعث کاهش ٦۸/۹ درصدی وزن بیولوژیک در گلدان نسبت به تیمار شاهد شد (به‌ترتیب ۱٤/۱۳ گرم در برابر ٤٥/٤ گرم). تیمارهای کم‌آبیاری در مراحل رشد رویشی، گلدهی و دانه‌بستن موجب کاهش وزن بیولوژیک در گلدان به‌ترتیب ۲۳/٥، ۱٥/۷ و ۱۰/۱درصد نسبت به تیمار شاهد بود (به‌ترتیب ۳٤/۷۱، ۳۸/۲٦، ٤۰/۷۹در برابر ٤٥/٤ گرم). کاربرد بیوچار نقش مؤثری در کاهش اثرات منفی تنش خشکی داشت. اضافه کردن ۱۰ و ۲۰ تن در هکتار بیوچار، بصورت میانگین وزن بیولوژیک در گلدان را به‌ترتیب ۹/٥۸ و ۱٤/٦۱ گرم افزایش داد (به‌ترتیب ۳٦ و ٥٥ درصد افزایش وزن بیولوژیک در گلدان). این نتایج نشان‌دهنده توانایی بیوچار در کاهش اثرات منفی تنش خشکی و حفظ وزن بیولوژیک در گلدان است (جدول ٤).

در تیمار کم‌آبیاری در کل دوره رشد به‌دلیل مدت زیاد تنش، حتی ۲۰ تن در هکتار بیوچار هم موجب افزایش قابل‌توجه زیست‌توده گیاه نشده است (شکل ۲-B). محققان گزارش کردند که تنش خشکی، عملکرد زیست‌توده کینوا را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد (٦۰). همچنین، کاهش ٥۰ درصدی میزان آب آبیاری منجر به کاهش معنی‌دار زیست‌توده گیاه (ریشه، ساقه و برگ) شد (٥۱). با این حال، بیوچار با تقویت ویژگی‌های خاک و افزایش دسترسی به آب و مواد مغذی، زیست‌توده کل گیاه (ریشه، ساقه و برگ) را به‌طور معنی‌داری افزایش می‌دهد (۲٤). این امر به ویژه در مراحل حساس رشد، مانند دانه‌بستن و گلدهی، اثرات مثبت چشمگیری دارد و به تعدیل اثرات منفی خشکی کمک می‌کند (٤۸). در این پژوهش مشخص شد که استفاده از ۲۰ تن در هکتار بیوچار باعث کاهش اختلاف وزن بیولوژیک در گلدان بین تیمارهای کم‌آبیاری در مراحل رشد رویشی، گلدهی و دانه‌بستن شد، به‌طوری‌که در این تیمار تفاوت معنی‌داری در وزن بیولوژیک در گلدان بین مراحل مذکور مشاهده نشد (شکل ۲-B). استفاده از بیوچار باعث رشد بیشتر سیستم ریشه‌ای کینوا می‌شود. این موضوع به‌ویژه در شرایط کم‌آبی که نیاز به جذب آب از اعماق خاک افزایش می‌یابد، اهمیت دارد. با افزایش طول و زیست‌توده ریشه‌ها، گیاه می‌تواند به منابع آبی عمیق‌تر دسترسی داشته باشد و عملکرد خود را حفظ کند (٥٥). رشد بهتر ریشه‌ها به‌طور مستقیم بر سایر بخش‌های گیاه تأثیر می‌گذارد. بیوچار با تأمین مواد مغذی و حفظ رطوبت خاک، رشد شاخه‌ها، برگ‌ها و زیست‌توده گیاه را بهبود می‌بخشد. (۱۹، ٦۱).

وزن دانه درگلدان: تیمارهای کم‌آبیاری و بیوچار هر دو تأثیر معنی‌داری بر وزن دانه در گلدان داشتند (جدول ۳). تیمار کم‌آبیاری باعث کاهش معنی‌دار وزن دانه در گلدان شد؛ بطوری‌که این میزان کاهش در تیمارهای کم‌آبیاری در مرحله رویشی، گلدهی، دانه‌بستن و کل دوره رشد به‌ترتیب به‌اندازه ۱٤/٥، ۲٥/۳، ۱۸/۷ و ٦۰ درصد بود (جدول ٤). در حالیکه استفاده از مقادیر ۱۰ و ۲۰ تن در هکتار بیوچار افزایش ۲۸/۸ و ٥٤/۸ درصدی را ایجاد کردند (جدول ٤). در گیاهان زارعی دیگر نیز نتایج مشابهی بدست آمد و مشخص شد کاهش عملکرد در گندم و برنج تحت کم‌آبیاری در مرحله گلدهی به دلیل کاهش تعداد دانه و گرده‌افشانی نامناسب، تسریع پیری و کاهش سبزمانی برگ‌ها و متعاقباً کاهش طول دوره پرشدن و وزن دانه می‌باشد (٦۲، ٦۳، ٦٤). بیوچار به طور قابل توجهی زیست‌توده ریشه، ساقه و دانه را

افزایش می‌دهد (٦٥). همچنین اثر متقابل بیوچار و کود نیتروژن عملکرد تربچه را بهبود و نقش بیوچار را در بهبود کارایی مصرف کود نیتروژن گیاه نشان می دهد (٦٦). علاوه‌براین کاربرد بیوچار در گندم اثرات مثبتی بر تعداد پنجه، خوشه و عملکرد دانه دارد (٦٧). بیوچار از طریق بهبود کارایی استفاده از آب و افزایش جذب مواد مغذی، عملکرد دانه‌های کینوا را افزایش می‌دهد. گیاهان تیمار شده با بیوچار حتی در شرایط نامساعد نیز می‌توانند وزن یا تعداد دانه بیشتری تولید کنند (٢٨, ٦٨).

شاخص برداشت: اثر کم‌آبیاری بر شاخص برداشت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ٣). بیشترین میزان شاخص برداشت مربوط به تیمار کم‌آبیاری در کل دوره رشد با ٣٥/٤٨ درصد و کمترین مقدار با ٢٣/٤٢ درصد در تیمار کم‌آبیاری در دوره گلدهی مشاهده شد (جدول ٤). تنش خشکی در مرحله شیری‌شدن دانه بطورقابل توجهی شاخص برداشت کینوا را کاهش می‌دهد (٩). تحقیقات دیگر نیز نشان داد کم آبیاری از طریق کاهش وزن بیولوژیک در گلدان و وزن هزار دانه، عملکرد دانه و شاخص برداشت را کاهش می‌دهد (٦٩). نتایج تحقیق بر روی گیاهان زراعی دیگر مثل برنج و ذرت نیز نشان داد که مرحله گلدهی و دانه‌بستن به شدت به تنش خشکی حساس هستند (٦٣, ٧٠). در واقع تنش خشکی در مرحله گلدهی و دانه بستن منجر به کاهش شدید دانه پرشده می‌شود و متعاقباً عملکرد دانه و شاخص برداشت کاهش می‌یابد (٦٣). در شرایط خشکی، بیوچار به طور غیرمستقیم از طریق افزایش عملکرد زیست‌توده و وزن هزار دانه، شاخص برداشت را بهبود می‌بخشد (٦٩). به نظر می‌رسد بیوچار در انتقال بیشتر مواد از ساقه و برگ به دانه موثر است.



شکل ٢- اثر مقادیر متفاوت بیوچار بر ارتفاع و وزن بیولوژیک در **گلدان کینوا تحت تیمارهای مختلف آبیاری. شاهد (D1)، کم‌آبیاری در مرحله رویشی (D2)، مرحله گلدهی (D3)، مرحله پرشدن دانه (D4)، کل فصل رشد (D5)؛ بدون بیوچار (B1)، ١٠ تن در هکتار (B2)، ٢٠ تن در هکتار (B3).**

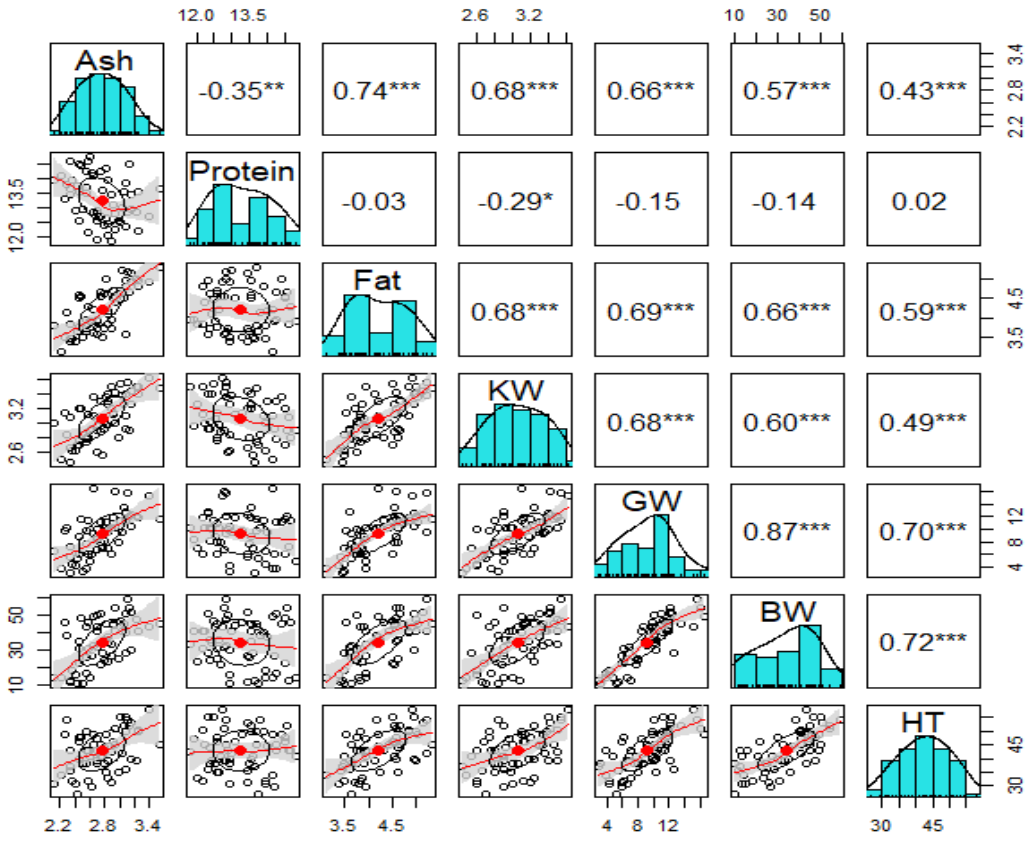
Figur 2. Impact of different contents of biochar on height and biological weight per pot of quinoa under various irrigation treatments. control (D1), deficit irrigation in vegetative stage (D2), flowering stage (D3), grain filling stage (D4), Full-season deficit irrigation (D5); non-biochar (B1), 10 t.ha^{-1} (B2), 20 t.ha (B3) biochar.

وزن هزار دانه: اثر کم‌آبیاری در مراحل مختلف رشد و بیوچار بر وزن هزار دانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بودند (جدول ۳). بیشترین وزن هزار دانه مربوط به تیمار کم‌آبیاری در مرحله گلدهی با ۳/۳٤ گرم و کمترین مقدار با ۲/۷۳ گرم در تیمار کم‌آبیاری در کل دوره رشد مشاهده شد. تحت تاثیر تیمار بیوچار بیشترین میزان وزن هزار دانه با ۳/۱۹ گرم مربوط به تیمار ۲۰ تن در هکتار بیوچار بود و کمترین مقدار با ۲/۹ گرم در تیمار بدون کاربرد بیوچار مشاهده شد. وزن هزار دانه یکی از شاخص‌های مهم عملکرد است که تحت تأثیر مستقیم شرایط محیطی و مدیریت تغذیه قرار دارد. طبق نتایج پژوهشگران تنش خشکی در مراحل مختلف رشد بر رشد، عملکرد و کیفیت گندم اثر قابل‌توجهی دارد و کمترین وزن هزار دانه تحت تیمار تنش خشکی در مرحله دانه بستن و بیشترین وزن هزار دانه در تیمارهای تنش در مرحله گلدهی و شاهد بدست آمد (۷۰، ٦۲) که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد (جدول ٤). به‌نظر می‌رسد در شرایط تنش خشکی بیوچار می‌تواند وزن هزار دانه را از طریق بهبود دسترسی گیاه به آب و مواد مغذی افزایش دهد (٤۸).

پروتئین دانه: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر کم‌آبیاری در مراحل مختلف رشد و بیوچار بر مقدار پروتئین دانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). بیشترین میزان پروتئین دانه با ۱٤/۲٤ درصد مربوط به تیمار کم‌آبیاری در کل مراحل رشد و کمترین مقدار با ۱۲/٤٥ درصد در تیمار شاهد مشاهده شد. تحت تاثیر بیوچار، بیشترین مقدار پروتئین دانه با ۱۳/۷۷ درصد مربوط به تیمار ۲۰ تن در هکتار بیوچار و کمترین مقدار با ۱۳/۰۱ درصد در تیمار بدون بیوچار بود (جدول ٤). امباوه (۲۰۱۳) گزارش کرد که خشکی به‌ویژه در مراحل زایشی گندم، مقدار پروتئین بذر را به‌طور معنی‌داری افزایش داد که با نتایج این مطالعه همخوانی دارد (٦۲). افزایش پروتئین دانه به علت کاهش تولید و ذخیره کربوهیدرات است که منجر به افزایش غلظت نیتروژن در دانه می‌شود (۷۱). نتایج قبادی و همکاران (۲۰۰٦) نشان داد که تیمار خشکی طولانی مدت (از مرحله طویل شدن ساقه تا رسیدگی دانه کلزا) بالاترین میزان پروتئین دانه را دارد که نتایج این تحقیق را تأیید می‌کند (۷۲). ترکیبات بیوشیمیایی بذر کینوا (پروتئین، روغن، فیبر، نشاسته و آسکوربیک اسید) با کاربرد کمپوست و بیوچار اسیدی در تیمارهای تحت خشکی به‌دلیل کمک به حلالیت و جذب بهتر عناصر غذایی به‌طور قابل توجه‌ای افزایش می‌یابد؛ درحالیکه تقریباً از تمام مواد ضد مغذی به‌دلیل کاهش حالالیت پذیری آن‌ها به‌طور معنی‌داری کاسته می‌شود (۷۳). یافته‌های این پژوهش با نتایج یاداو و همکاران (۲۰۱۳) مطابقت دارد که اظهار داشتند کیفی غذایی دانه با کاربرد اصلاح کننده‌های آلی بهبود می‌یابد (۷٤). بخشی از این افزایش محتوای کیفی دانه به‌دلیل بهبود دسترسی و جذب عناصر غذایی بخصوص نیتروژن و پتاسیم است که برای سنتز پروتئین و تحمل به خشکی ضروری هستند (۷٥). به‌نظر می‌رسد بهبود نگه‌داشت و جذب نیتروژن در خاک با کاربرد بیوچار، می‌تواند تولید پروتئین در دانه را افزایش دهد (۷٦).

روغن و خاکستر دانه: اثر کم‌آبیاری در مراحل مختلف رشد و بیوچار بر مقدار روغن و خاکستر دانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). تنش خشکی به غیر از مرحله رشد رویشی در سایر مراحل تاثیر قابل‌توجهی بر میزان روغن و خاکستر دانه داشته است. بیشترین میزان کاهش روغن و خاکستر دانه پس از تنش در کل دوره مربوط به مرحله دانه‌بستن به‌ترتیب به‌اندازه ۰/٦۹ و ۰/٤۲ درصد بود. بیشترین میزان خاکستر دانه با ۳/۰۱ درصد مربوط به تیمار شاهد و کمترین مقدار با ۲/۳۹ درصد در

تیمار کم‌آبیاری در کل مراحل رشد مشاهده شد که با اثر تیمار کم‌آبیاری در مرحله دانه‌بستن و گلدهی به‌ترتیب به میزان ۲/۵۹ و ۲/۷۸ درصد دنبال شد. مقادیر ۱۰ و ۲۰ تن در هکتار بیوچار، روغن و خاکستر دانه را به‌ترتیب ۰/۸ و ۰/۲ درصد در مقایسه با تیمار بدون بیوچار افزایش داد (جدول ٤). هاتزیگ و همکاران (۲۰۱۸) نشان دادند که تنش خشکی به طور معنی‌داری میزان روغن دانه در تمام ارقام کلزا را کاهش می‌دهد (۷۷). این کاهش به همراه افزایش پروتئین دانه تحت تنش خشکی در مطالعات دیگر نیز تأیید شده است (۷۸). اثر کم‌آبیاری کوتاه و بلند مدت بر میزان روغن دانه کلزا بررسی شد و کمترین میزان روغن دانه در تیمار کم‌آبیاری در کل مراحل رشد گیاه گزارش شده است (۷۲) که با نتایج این مطالعه تطابق دارد. در شرایط تنش خشکی، بیوچار نه تنها باعث افزایش پروتئین دانه، بلکه موجب بهبود میزان روغن و خاکستر دانه نیز شده است. ساختار متخلخل بیوچار و تأثیر آن بر فعالیت میکروارگانیسم‌های خاک، زمینه‌ساز بهبود جذب عناصر غذایی مانند پتاسیم (۷۹)، فسفر، کلسیم و منیزیم شده و محتوای روغن و خاکستر دانه را افزایش می‌دهد (۷۳، ۷٦، ۸۰). این ویژگی‌ها ارزش تغذیه‌ای و اقتصادی محصول را در شرایط نامساعد محیطی ارتقا می‌دهد.



شکل ۳- آنالیز همبستگی بین خصوصیات عملکرد کمی و کیفی کینوا رقم ساجاما. HT: ارتفاع گیاه، BW: وزن بیولوژیک در گلدان، GW: وزن دانه در گلدان، KW: وزن هزار دانه، Fat: روغن دانه، Protein: پروتئین دانه و Ash: خاکستر دانه.

Figure 3. Correlation analysis between quantitative and qualitative yield traits of quinoa cv. Sajama. HT: height, BW: biological weight in pot, GW: grain weight in pot, KW: 1000 grain weight, Fat: grain oil, protein: grain protein, Ash: grain ash.

آنالیز همبستگی: ارتفاع گیاه بیشترین ارتباط را با وزن بیولوژیک در گلدان دارد و همچنین بالاترین ارتباط بین وزن هزار دانه با وزن دانه در گلدان نسبت به سایر خصوصیات عملکرد کمی وجود دارد (شکل ۳). بر اساس شکل ۳ بیشترین همبستگی در عملکرد کمی، بین وزن بیولوژیک در گلدان و دانه به‌میزان ۸۷ درصد وجود دارد که نشان می‌دهد تولید زیست توده بیشتر ارتباط مستقیمی در افزایش عملکرد دانه دارد (۸۱). علاوه بر این مشخص شد تمام خصوصیات عملکرد کمی گیاه با میزان چربی و خاکستر دانه ارتباط مثبت و قوی دارند و بالاترین همبستگی بین وزن دانه در گلدان با روغن دانه و بین وزن هزار دانه با خاکستر دانه وجود دارد. با این حال ارتباط بسیار ضعیفی بین پروتئین دانه با سایر خصوصیات مورد مطالعه وجود دارد (شکل ۳). با توجه به جدول ٤، کم‌آبیاری باعث کاهش عملکرد گیاه می‌شود ولی استفاده از بیوچار توانسته است باعث بهبود عملکرد شود. به‌نظر می‌رسد با افزایش وزن بیولوژیک و دانه ناشی از کاربرد بیوچار، میزان روغن و خاکستر دانه نیز افزایش یافته است.

نتیجه‌گیری

این تحقیق به منظور بررسی اثر کم‌آبیاری در مراحل مختلف رشد بر عملکرد گیاه کینوا تحت مقادیر متفاوت بیوچار انجام شد. نتایج نشان داد که کم‌آبیاری به غیر از پروتئین دانه منجر به کاهش معنی‌دار تمام خصوصیات عملکرد کمی و کیفی کینوا (وزن دانه در گلدان ، وزن بیولوژیک در گلدان، ارتفاع، وزن هزار دانه، روغن دانه و خاکستر دانه) می‌شود به عبارت دیگر کم‌آبیاری در هر مرحله از رشد عملکرد کمی و کیفی کینوا را کاهش می‌دهد. کم‌آبیاری در کل دوره رشد گیاه، وزن دانه در گلدان را تا بیش از ٦۰ درصد کاهش داد که این به دلیل برگ‌ریزی شدید ناشی از کم‌آبیاری بود که این کاهش در تیمارهای کم‌آبیاری در مرحله رویشی، گلدهی و دانه بستن نیز قابل توجه بود. این درحالی است که کم‌آبیاری باعث کاهش قابل توجه روغن و خاکستر دانه و افزایش پروتئین دانه شد. همچنین مشخص شد حساس ترین مرحله در رابطه با عملکرد و اجزای عملکرد مرحله گلدهی گیاه به دلیل عدم باروری گل‌ها و تولید دانه کمتر است. کم‌آبیاری در کل دوره رشد گیاه، بالاترین شاخص برداشت را داشت؛ چون کاهش وزن بیولوژیک در گلدان نسبت به کاهش وزن دانه در گلدان در این تیمار بسیار بیشتر از سایر تیمارها بود. در رابطه با شاخص‌های وزن دانه در گلدان، وزن بیولوژیک در گلدان و وزن هزار دانه نزدیک‌ترین تیمار به شاهد تیمار کم‌آبیاری در مرحله رویشی می‌باشد. علاوه بر این بیوچار می‌تواند عملکرد و اجزای عملکرد گیاه کینوا را به‌طور قابل توجه‌ای افزایش دهد. به نظر می‌رسد بیوچار پوست پسته توانسته است ظرفیت نگهداری آب در خاک و خصوصیات شیمیایی در خاک را بهبود بخشد. بطوری‌که ۲۰ تن در هکتار بیوچار موجب شد روغن، خاکستر و پروتئین دانه افزایش یابد. مطالعه همبستگی خصوصیات عملکرد کمی و کیفی کینوا نشان داد افزایش میزان بیوچار می‌تواند از طریق افزایش رشد گیاه در بهبود عملکرد کمی و کیفی کینوا تاثیر به‌سزایی داشته باشد. باتوجه به پایداری بالای بیوچار، پیشنهاد می‌شود که تحقیقات بیشتری در زمینه اثرات بلندمدت و مزرعه‌ای بیوچار بر خصوصیات خاک و رشد کینوا در مناطق خشک انجام شود.

References

1. Hudson, A. R., Peters, D. P., Blair, J. M., Childers, D. L., Doran, P. T., Geil, K., Gooseff, M., Gross, K. L., Haddad, N. M., & Pastore, M. A. (2022). Cross-site comparisons of dryland ecosystem response to climate change in the US Long-Term Ecological Research Network. *BioScience*, *72*(9), 889-907. https://doi.org/https://doi.org/10.1093/biosci/biab134
2. Ohba, M. (2021). Precipitation under climate change. In *Precipitation* (pp. 21-51). Elsevier. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822699-5.00002-1
3. Daramola, M. T., & Xu, M. (2022). Recent changes in global dryland temperature and precipitation. *International Journal of Climatology,* 2, 1267-1282. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/joc.7301
4. Kheyruri, Y., Neshat, A., Sharafati, A., & Hameed, A. S. (2024). Identifying the most effective climate parameters on crop yield in rain-fed agriculture and irrigated farming in Iran. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, *136*, 103744. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103744
5. Safdari, Z., Nahavandchi, H., & Joodaki, G. (2022). Estimation of groundwater depletion in Iran's catchments using well data. *Water*, *14*(1), 131. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/w14010131
6. Emadodin, I., Reinsch, T., & Taube, F. (2019). Drought and desertification in Iran. *Hydrology*, *6*(3), 66. https://doi.org/10.3390/hydrology6030066
7. Bazile, D., Bertero, H. D., & Nieto, C. (2015). *State of the Art Report on Quinoa around the World in 2013* (1 ed.). FAO & CIRAD.
8. Ruiz, K. B., Biondi, S., Oses, R., Acuña-Rodríguez, I. S., Antognoni, F., Martinez-Mosqueira, E. A., Coulibaly, A., Canahua-Murillo, A., Pinto, M., & Zurita-Silva, A. (2014). Quinoa biodiversity and sustainability for food security under climate change. A review. *Agronomy for sustainable development*, *34*, 349-359. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s13593-013-0195-0
9. Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., Vacher, J., Mamani, R., Mendoza, J., Huanca, R., Morales, B., Miranda, R., & Cusicanqui, J. (2008). Introducing deficit irrigation to stabilize yields of quinoa (Chenopodium quinoa Willd.). *European journal of agronomy*, *28*(3), 427-436. https://doi.org/10.1016/j.eja.2007.11.008
10. Talebnejad, R., & Sepaskhah, A. (2015). Effect of deficit irrigation and different saline groundwater depths on yield and water productivity of quinoa. *Agricultural Water Management*, *159*, 225-238. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.06.005
11. Jokarfard, V., Rabiei, B., Laki, E. S., & Börner, A. (2024). Stability and adaptability of grain yield in quinoa genotypes in four locations of Iran. *Frontiers in Plant Science*, *15*, 1487106. https://doi.org/https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1487106
12. Bagheri, M., Anafjeh, Z., Taherian, M., Emami, A., Molaie, A., & Keshavarz, S. (2021). Assessment of adaptability and seed yield stability of selected quinoa (Chenopodium quinoa Willd.) genotypes in spring cropping systems in cold and temperate regions of Iran. *IRANIAN JOURNAL OF CROP SCIENCES*, *22*(4), 376-387 [In Persian]. https://doi.org/https://doi.org/10.52547/abj.22.4.376
13. Etaati, M., Ardakani, M. R., Bagheri, M., Paknejad, F., & Golzardi, F. (2023). Grain yield adaptability and stability of quinoa (Chenopodium quinoa Willd.) genotypes using different stability indices. *Journal of Crop Ecophysiology*, *17*(65), 1-14 [In Persian]. https://doi.org/https://doi.org/10.30495/JCEP.2023.1935024.1815
14. Mamedi, A., Tavakkol Afshari, R., & Oveisi, M. (2017). Cardinal temperatures for seed germination of three quinoa (Chenopodium quinoa Willd.) cultivars. *Iranian Journal of Field Crop Science*, *48*(Special Issue), 89-100 [In Persian]. https://doi.org/https://doi.org/10.22059/ijfcs.2017.206204.654106
15. Sigstad, E. E., & Prado, F. E. (1999). A microcalorimetric study of Chenopodium quinoa Willd. seed germination. *Thermochimica acta*, *326*(1-2), 159-164. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0040-6031(98)00599-1

16. Ghorbani, K., & Jamali, S. (2021). The effects of irrigation with different mixture Caspian seawater and fresh water on yield of quinoa (cv Sajama) in greenhouse conditions. *Journal of Water and Soil Conservation*, *28*(2), 63-81 [In Persian]. https://doi.org/https://doi.org/10.22069/jwsc.2021.18372.3397
17. Shadmehri, A., & Abbas Dokht, H. (2024). Assessing the Interactive Effects of Priming and Drought Stress on Yield and Selected Growth Characteristics of Three Quinoa (Chenopodium quinoa Willd) Cultivars. *Journal of Medicinal plants and By-Products*. https://doi.org/https://doi.org/10.22034/jmpb.2024.366987.1758
18. Vacher, J.-J. (1998). Responses of two main Andean crops, quinoa (Chenopodium quinoa Willd) and papa amarga (Solanum juzepczukii Buk.) to drought on the Bolivian Altiplano: Significance of local adaptation. *Agriculture, ecosystems & environment*, *68*(1-2), 99-108. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-8809(97)00140-0
19. Akram, M. Z., Libutti, A., & Rivelli, A. R. (2023). Evaluation of vegetative development of quinoa under water stress by applying different organic amendments. *Agronomy*, *13*(5), 1412. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/agronomy13051412
20. Fathi Gerdelidani, A., & Mirsyd Hosseini, H. (2014). *Different aspects of the effects of biochar in improving soil quality.* International Conference on Applied Research in Agriculture, Iran [In Persian]. https://civilica.com/doc/414849
21. Lehmann, J., Gaunt, J., & Rondon, M. (2006). Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems–a review. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, *11*(2), 403-427. https://doi.org/10.1007/s11027-005-9006-5
22. Briggs, C. M., Breiner, J., & Graham, R. (2005). Contributions of Pinus Ponderosa charcoal to soil chemical and physical properties. The ASACSSA-SSSA International Annual Meetings. Salt Lake City, USA https://doi.org/10.1137/1.9780898717914.ch1,
23. Gaskin, J. W., Speir, R. A., Harris, K., Das, K., Lee, R. D., Morris, L. A., & Fisher, D. S. (2010). Effect of peanut hull and pine chip biochar on soil nutrients, corn nutrient status, and yield. *Agronomy Journal*, *102*(2), 623-633. https://doi.org/10.2134/agronj2009.0083
24. Kammann, C. I., Linsel, S., Gößling, J. W., & Koyro, H.-W. (2011). Influence of biochar on drought tolerance of Chenopodium quinoa Willd and on soil–plant relations. *Plant and soil*, *345*(1), 195-210. https://doi.org/10.1007/s11104-011-0771-5
25. Tourajzadeh, O., Piri, H., Naserin, A., & mahdi Cahri, M. (2024). Effect of nano biochar addition and deficit irrigation on growth, physiology and water productivity of quinoa plants under salinity conditions. *Environmental and experimental botany*, *217*, 105564. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2023.105564
26. Abbas, G., Abrar, M. M., Naeem, M. A., Siddiqui, M. H., Ali, H. M., Li, Y., Ahmed, K., Sun, N., & Xu, M. (2022). Biochar increases salt tolerance and grain yield of quinoa on saline-sodic soil: multivariate comparison of physiological and oxidative stress attributes. *Journal of soils and sediments*, *22*(5), 1446-1459. https://doi.org/10.1007/s11368-022-03159-2
27. Derbali, I., Derbali, W., Gharred, J., Manaa, A., Slama, I., & Koyro, H.-W. (2023). Mitigating salinity stress in Quinoa (Chenopodium quinoa Willd.) With Biochar and Superabsorber Polymer amendments. *Plants*, *13*(1), 92. https://doi.org/10.3390/plants13010092
28. Yang, A., Akhtar, S. S., Li, L., Fu, Q., Li, Q., Naeem, M. A., He, X., Zhang, Z., & Jacobsen, S.-E. (2020). Biochar mitigates combined effects of drought and salinity stress in quinoa. *Agronomy*, *10*(6), 912. https://doi.org/10.3390/agronomy10060912
29. Turan, V. (2019). Confident performance of chitosan and pistachio shell biochar on reducing Ni bioavailability in soil and plant plus improved the soil enzymatic activities, antioxidant defense system and nutritional quality of lettuce. *Ecotoxicology and environmental safety*, *183*, 109594. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109594
30. Miri, F., Zamani, J., & Zarebanadkouki, M. (2021). The Effect of Different Levels of Pistachio Harvesting Wastes Biochar on Growth and Water Productivity of Maize (Zea mays

L.). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *52*(1), 227-236 [In Persian]. https://doi.org/10.22059/IJSWR.2020.312593.668779

31. Arab Bafrani, Z., Ghanei-Bafghi, M.-J., & Shirmardi, M. (2020). Effect of wood residues of pistachio biochar on growth characteristics of Safflower. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, *10*(3), 73-94. https://doi.org/10.22069/EJSMS.2021.17831.1937
32. Sosa-Zuniga, V., Brito, V., Fuentes, F., & Steinfort, U. (2017). Phenological growth stages of quinoa (Chenopodium quinoa) based on the BBCH scale. *Annals of Applied Biology*, *171*(1), 117-124. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/aab.12358
33. Abbaspour, F., Asghari, H., Moghaddam, P. R., Abbasdokht, H., Shabahang, J., & Babaei, A. B. (2019). Effects of biochar on soil fertility and water use efficiency of black seed (Nigella sativa L.) under water stress conditions. *Iranian Journal of Field and Crop Research*, *17*(1), 39-52 [In Persian]. https://doi.org/https://doi.org/10.22067/gsc.v17i1.63344
34. Ghias, S., Shirmardi, M., Meftahizadeh, H., & Dehestani Ardakani, M. (2022). Effect of Biochar and Hydrogel on Morphophysiological and Biochemical Characteristics of Common Sage (Salvia officinalis L.) under Drought Stress. *Plant Productions*, *45*(1), 67-80 [In Persian]. https://doi.org/https://doi.org/10.22055/ppd.2021.36030.1962
35. Mir, E., Piri, H., & Naserin, A. (2021). Effects of different levels of wheat biochar and water stress on quantitative and qualitative characteristics of Carla (Bitter Melon) in potted conditions. *Journal of Water Research in Agriculture*, *35*(2), 169-185 [In Persian]. https://doi.org/https://doi.org/10.22092/jwra.2021.352930.845
36. Naeem, M. B., Jahan, S., Rashid, A., Shah, A. A., Raja, V., & El-Sheikh, M. A. (2024). Improving maize yield and drought tolerance in field conditions through activated biochar application. *Scientific Reports*, *14*(1), 25000. https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s41598-024-76082-w
37. Rajkovich, S., Enders, A., Hanley, K., Hyland, C., Zimmerman, A. R., & Lehmann, J. (2012). Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. *Biology and Fertility of Soils*, *48*(3), 271-284. https://doi.org/10.1007/s00374-011-0624-7
38. Liu, W.-J., Jiang, H., & Yu, H.-Q. (2015). Development of biochar-based functional materials: toward a sustainable platform carbon material. *Chemical reviews*, *115*(22), 12251-12285. https://doi.org/https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00195
39. parsa, m., Kamaei, R., & yousefi, b. (2022). Effect of chemical and biological fertilizers on the physiological characteristics and activity of some antioxidant enzymes of peppermint (Mentha piperita) under drought stress conditions. *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology)*, *35*(4), 657-673 [In Persian]. https://doi.org/https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23832592.1401.35.4.12.2
40. Comegna, A., Dragonetti, G., Kodesova, R., & Coppola, A. (2022). Impact of olive mill wastewater (OMW) on the soil hydraulic and solute transport properties. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *19*(8), 7079-7092. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s13762-021-03630-6
41. Villoro, A., Latorre, B., Tormo, J., Jiménez, J. J., López, M. V., Nicolau, J. M., Vicente, J., Gracia, R., & Moret-Fernández, D. (2021). A TDR wireless device for volumetric water content sensing. *Computers and electronics in agriculture*, *181*, 105939. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105939
42. Comegna, A., Coppola, A., Dragonetti, G., & Sommella, A. (2016). Estimating nonaqueous-phase liquid content in variably saturated soils using time domain reflectometry. *Vadose Zone Journal*, *15*(5), vzj2015. 2011.0145. https://doi.org/https://doi.org/10.2136/vzj2015.11.0145
43. Comegna, A., Severino, G., & Coppola, A. (2022). A review of new TDR applications for measuring non-aqueous phase liquids (NAPLs) in soils. *Environmental Advances*, *9*, 100296. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100296
44. Moret-Fernández, D., Lera, F., Latorre, B., Tormo, J., & Revilla, J. (2022). Testing of a commercial vector network analyzer as low-cost TDR device to measure soil moisture and

electrical conductivity. *Catena*, *218*, 106540. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106540
45. Pérez, M., Mendez, D., Avellaneda, D., Fajardo, A., & Páez-Rueda, C. I. (2023). Time-domain transmission sensor system for on-site dielectric permittivity measurements in soil: A compact, low-cost and stand-alone solution. *HardwareX*, *13*, e00398. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ohx.2023.e00398
46. Seibel, W. (1989). *Approved Methods. American Association of Cereal Chemists, St. Paul, MN, USA. Methods*. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/star.19890411114
47. AOAC. (1995). *Official Association of Official Analytical Chemists, St. Paul, MN, USA. Methods.* (16th ed., Vol. 1). AOAC International.
48. Haider, I., Raza, M. A. S., Iqbal, R., Aslam, M. U., Habib-ur-Rahman, M., Raja, S., Khan, M. T., Aslam, M. M., Waqas, M., & Ahmad, S. (2020). Potential effects of biochar application on mitigating the drought stress implications on wheat (Triticum aestivum L.) under various growth stages. *Journal of Saudi Chemical Society*, *24*(12), 974-981. https://doi.org/10.1016/j.jscs.2020.10.005
49. Rivelli, A. R., Akram, M. Z., & Libutti, A. (2023). Woody Biochar Rate and Water Shortage Impact on Early Growth Stages of Chenopodium quinoa Willd. *Agronomy*, *14*(1), 53. https://doi.org/10.3390/agronomy14010053
50. Al-Naggar, A., Abd El-Salam, R., Badran, A., & El-Moghazi, M. (2017). Genotype and drought effects on morphological, physiological and yield traits of quinoa (Chenopodium quinoa Willd.). *Asian J. Adv. Agric. Res*, *3*(1), 1-15. https://doi.org/10.9734/AJAAR/2017/36655
51. Hirich, A., Choukr-Allah, R., & Jacobsen, S.-E. (2014). The combined effect of deficit irrigation by treated wastewater and organic amendment on quinoa (Chenopodium quinoa Willd.) productivity. *Desalination and Water Treatment*, *52*(10-12), 2208-2213. https://doi.org/10.1080/19443994.2013.777944
52. Sun, Y., Liu, F., Bendevis, M., Shabala, S., & Jacobsen, S. E. (2014). Sensitivity of two quinoa (ChenopodiumquinoaWilld.) varieties to progressive drought stress. *Journal of Agronomy and Crop Science*, *200*(1), 12-23. https://doi.org/10.1111/jac.12042
53. Yang, A., Akhtar, S., Amjad, M., Iqbal, S., & Jacobsen, S. E. (2016). Growth and physiological responses of quinoa to drought and temperature stress. *Journal of Agronomy and Crop Science*, *202*(6), 445-453. https://doi.org/10.1111/jac.12167
54. Naderi, M., Noormohammadi, G., Majidi, I., Darvish, F., Shirani Rad, A. H., & Madani, H. (2005). Evaluation of summer safflower response to different intensities of drought stress in Isfahan region. *IRANIAN JOURNAL OF CROP SCIENCES*, *7*(3), 212-225 [In Persian]. https://doi.org/https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.15625540.1384.7.3.3.9
55. Akram, M. Z., Libutti, A., & Rivelli, A. R. (2024). Drought stress in quinoa: Effects, responsive mechanisms, and management through biochar amended soil: A review. *Agriculture*, *14*(8), 1418. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/agriculture14081418
56. Dong, D., Feng, Q., Mcgrouther, K., Yang, M., Wang, H., & Wu, W. (2015). Effects of biochar amendment on rice growth and nitrogen retention in a waterlogged paddy field. *Journal of soils and sediments*, *15*, 153-162. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11368-014-0984-3
57. Zhang, W., Niu, W., & Luo, H. (2024). Effect of Biochar Amendment on the Growth and Photosynthetic Traits of Plants Under Drought Stress: A Meta-Analysis. *Agronomy*, *14*(12), 2952. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/agronomy14122952
58. Liang, B., Lehmann, J., Solomon, D., Kinyangi, J., Grossman, J., O'Neill, B., Skjemstad, J. O., Thies, J., Luizão, F. J., & Petersen, J. (2006). Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Science Society of America Journal*, *70*(5), 1719-1730. https://doi.org/https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0383
59. Steiner, C., Teixeira, W. G., Lehmann, J., Nehls, T., de Macêdo, J. L. V., Blum, W. E., & Zech, W. (2007). Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop

production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. *Plant and soil*, *291*, 275-290. https://doi.org/10.1007/s11104-007-9193-9

60. Sanchez, H. B., Lemeur, R., Damme, P. V., & Jacobsen, S.-E. (2003). Ecophysiological analysis of drought and salinity stress of quinoa (Chenopodium quinoa Willd.). *Food Reviews International*, *19*(1-2), 111-119. https://doi.org/10.1081/FRI-120018874
61. Akram, M. Z., Rivelli, A. R., Libutti, A., Liu, F., & Andreasen, C. (2024). Mitigation of drought stress for Quinoa (Chenopodium quinoa Willd.) varieties using woodchip biochar-amended soil. *Plants*, *13*(16), 2279. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/plants13162279
62. Mbave, Z. A. (2013). *Water stress effects on growth, yield and quality of wheat (Triticum aestivum L.)* [Ph.D. Theses, University of Pretoria].
63. Sarvestani, Z. T., Pirdashti, H., Sanavy, S., & Balouchi, H. (2008). Study of water stress effects in different growth stages on yield and yield components of different rice (Oryza sativa L.) cultivars. *Pakistan journal of biological sciences: PJBS*, *11*(10), 1303-1309. https://doi.org/10.3923/pjbs.2008.1303.1309
64. Clarke, J. M., Townley-Smith, F., McCaig, T. N., & Green, D. G. (1984). Growth Analysis of Spring Wheat Cultivars of Varying Drought Resistance. *Crop Science*, *24*(3), 537-541. https://doi.org/10.2135/cropsci1984.0011183X002400030026x
65. Gebremedhin, G., Bereket, H., Daniel, B., & Tesfaye, B. (2015). Effect of biochar on yield and yield components of wheat and post-harvest soil properties in Tigray, Ethiopia. *J Fertil Pestic*, *6*(158), 2. https://doi.org/10.4172/2471-2728.1000158
66. Chan, K. Y., Van Zwieten, L., Meszaros, I., Downie, A., & Joseph, S. (2008). Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. *Soil Research*, *45*(8), 629-634. https://doi.org/10.1071/SR07109
67. Akhtar, S. S., Andersen, M. N., & Liu, F. (2015). Residual effects of biochar on improving growth, physiology and yield of wheat under salt stress. *Agricultural Water Management*, *158*, 61-68. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.04.010
68. Daraei, E., Bayat, H., & Gregory, A. S. (2024). Impact of natural biochar on soil water retention capacity and quinoa plant growth in different soil textures. *Soil and Tillage Research*, *244*, 106281. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106281
69. Aslam, M. U., Raza, M. A. S., Saleem, M. F., Waqas, M., Iqbal, R., Ahmad, S., & Haider, I. (2020). Improving strategic growth stage-based drought tolerance in quinoa by rhizobacterial inoculation. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *51*(7), 853-868. https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1744634
70. Rabbani, J., & Emam, Y. (2011). Yield Response of Maize Hybrids to Drought Stress at Different Growth Stages. *Journal of Crop production and processing*, *1*(2), 65-78 [In Persian]. https://doi.org/http://dorl.net/dor/20.1001.1.22518517.1390.1.2.5.0
71. Saint Pierre, C., Peterson, C. J., Ross, A. S., Ohm, J. B., Verhoeven, M. C., Larson, M., & Hoefer, B. (2008). White wheat grain quality changes with genotype, nitrogen fertilization, and water stress. *Agronomy Journal*, *100*(2), 414-420. https://doi.org/https://doi.org/10.2134/agronj2007.0166
72. Ghobadi, M., Bakhshandeh, M., Fathi, G., Gharineh, M., Alami-Said, K., Naderi, A., & Ghobadi, M. (2006). Short and long periods of water stress during different growth stages of canola (Brassica napus L.): effect on yield, yield components, seed oil and protein contents. *Journal of Agronomy*, *5*(2), 336-341. https://doi.org/10.3923/ja.2006.336.341
73. Ramzani, P. M. A., Shan, L., Anjum, S., Ronggui, H., Iqbal, M., Virk, Z. A., & Kausar, S. (2017). Improved quinoa growth, physiological response, and seed nutritional quality in three soils having different stresses by the application of acidified biochar and compost. *Plant Physiology and Biochemistry*, *116*, 127-138. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.05.003
74. Yadav, G. S., Shivay, Y., Kumar, D., & Babu, S. (2013). Enhancing iron density and uptake in grain and straw of aerobic rice through mulching and rhizo-foliar fertilization of iron. *Afr. J. Agric. Res*, *8*, 5447-5454. https://doi.org/10.5897/AJAR20xx.xxx

75. Mannan, M., Mia, S., Halder, E., & Dijkstra, F. A. (2021). Biochar application rate does not improve plant water availability in soybean under drought stress. *Agricultural Water Management*, *253*, 106940. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106940
76. Wu, Y., Wang, X., Zhang, L., Zheng, Y., Liu, X., & Zhang, Y. (2023). The critical role of biochar to mitigate the adverse impacts of drought and salinity stress in plants. *Frontiers in Plant Science*, *14*. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1163451
77. Hatzig, S. V., Nuppenau, J.-N., Snowdon, R. J., & Schießl, S. V. (2018). Drought stress has transgenerational effects on seeds and seedlings in winter oilseed rape (Brassica napus L.). *BMC plant biology*, *18*, 1-13. https://doi.org/10.1186/s12870-018-1531-y
78. Aslam, M., Nelson, M., Kailis, S., Bayliss, K., Speijers, J., & Cowling, W. (2009). Canola oil increases in polyunsaturated fatty acids and decreases in oleic acid in drought-stressed Mediterranean-type environments. *Plant Breeding*, *128*(4), 348-355. https://doi.org/10.1111/j.1439-0523.2008.01577.x
79. Alsamadany, H., Alharby, H. F., Al-Zahrani, H. S., Alzahrani, Y. M., Almaghamsi, A. A., Abbas, G., & Farooq, M. A. (2022). Silicon-nanoparticles doped biochar is more effective than biochar for mitigation of arsenic and salinity stress in Quinoa: Insight to human health risk assessment. *Frontiers in Plant Science*, *13*, 989504. https://doi.org/https://doi.org/10.3389/fpls.2022.989504
80. Khan, S., Irshad, S., Mehmood, K., Hasnain, Z., Nawaz, M., Rais, A., Gul, S., Wahid, M. A., Hashem, A., & Abd_Allah, E. F. (2024). Biochar production and characteristics, its impacts on soil health, crop production, and yield enhancement: A review. *Plants*, *13*(2), 166. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/plants13020166
81. Ghazouani, H., Ibrahimi, K., Amami, R., Helaoui, S., Boughattas, I., Kanzari, S., Milham, P., Ansar, S., & Sher, F. (2023). Integrative effect of activated biochar to reduce water stress impact and enhance antioxidant capacity in crops. *Science of the Total Environment*, *905*, 166950. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166950