نشریه فرآیند و کارکرد گیاهی، جلد ۱۵، شماره ۷۲، خرداد و تیر ۱۴۰۵ صفحه: ۵۷-۷۵
https://doi.org/10.22034/15.72.57

مقاله پژوهشی

پاسخ رشدی دانهال بادام رقم شکوفه (*Prunus amygdalus* var. Shokoufeh) به کاربرد خاکی بیوچار و محلول‌پاشی نانوذرات سیلیس تحت تنش کم‌آبیاری

لمیا وجودی مهربانی* و زهرا معصوم‌پور

گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

چکیده

خشکی از مهم‌ترین تنش‌های محیطی است که باعث اختلال در فرآیندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه شده و رشد و عملکرد آن را محدود می‌کند. شناسایی ترکیباتی که موجب کاهش اثرات تنش بر گیاه شوند حائز اهمیت است. به‌منظور ارزیابی تأثیر تنش کم‌آبیاری روی بادام رقم شکوفه مطالعه‌ای با سه سطح تنش کم‌آبیاری (۱۰۰، ۵۰ و ۳۰ درصد ظرفیت زراعی)، کاربرد بیوچار (صفر و ۲۰ گرم در کیلوگرم) و محلول‌پاشی نانوذرات سیلیس (صفر و ۳ میلی‌گرم در لیتر) به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه شهید مدنی آذربایجان انجام شد. تیمار آبیاری در ۱۰۰ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی همراه با کاربرد بیوچار و محلول‌پاشی (صفر و ۳ میلی‌گرم در لیتر) نانوذرات سیلیس منجربه افزایش وزن خشک، محتوای کلروفیل a، فسفر و پتاسیم گیاه شد. محتوای نیتروژن و کلسیم در تیمار آبیاری در ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی همرا با کاربرد بیوچار و محلول‌پاشی نانوذره افزایش یافت. بیشترین فعالیت کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز و محتوای پرولین در تیمار آبیاری در ۳۰ درصد ظرفیت زراعی همراه با کاربرد هر دو سطح بیوچار و محلول‌پاشی مشاهده شد. کم‌آبیاری (۳۰ درصد ظرفیت زراعی) موجب افزایش محتوای پراکسید هیدروژن و مالون دی‌آلدئید در گیاه شد. نتایج نشان داد که استفاده همزمان از بیوچار و محلول‌پاشی نانوذرات سیلیس به‌عنوان راهکاری مؤثر برای بهبود رشد و تحمل بادام رقم شکوفه در مواجه با کم‌آبی، اهمیت فراوانی دارد. مدیریت بهینه آبیاری همراه با کاربرد این اصلاح‌کننده‌ها می‌تواند با تقویت صفات فیزیولوژیک و کاهش تنش اکسیداتیو، رشد گیاه را در شرایط تنش خشکی بهبود بخشد.

واژه‌های کلیدی: عناصر، کاتالاز، کلروفیل، محتوای نسبی آب، محتوای مواد جامد محلول

مقدمه

تنش خشکی، به‌عنوان یک عامل محیطی پویا و چندبعدی، محدود به یک ناحیه جغرافیایی یا بازه زمانی خاص نیست و یکی از تهدیدهای عمده بقا و عملکرد گیاهان در

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۲۶، بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۰۸، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۷، اولین انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۱۲

* نویسنده مسئول، رایانامه: vojodilamia@gmail.com

حق انتشار این مستند، متعلق به انجمن فیزیولوژی گیاهی ایران است. ۱۴۰۳ ©

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است:
Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: DOI: 10.22034/15.72.57]

اکوسیستم‌های خشک و نیمه‌خشک جهان به شمار می‌آید. شدت این تنش به متغیرهای متعددی از جمله میزان بارندگی، ظرفیت نگهداری آب خاک، الگوی فضایی و زمانی بارش، شدت تبخیر و اثرات گرمایش جهانی وابسته است (Ahluwalia *et al*., 2021). گیاهان به منظور بقا و سازگاری در شرایط کم‌آبی، مکانیسم‌های تطبیقی پیچیده‌ای از جمله فرار از خشکی، اجتناب از خشکی و تحمل خشکی را به صورت همزمان یا مجزا به کار می‌گیرند (Yang *et al*., 2016). پاسخ گیاه به تنش خشکی را می‌توان به پاسخ‌های کوتاه‌مدت (کاهش جذب کربن، بسته‌شدن روزنه‌ها، تنظیم اسمزی، مهار رشد و انتقال سیگنال‌های خشکی) و بلندمدت (توقف رشد ساقه و سازگاری‌های متابولیک) تقسیم نمود. این پاسخ‌ها معمولاً آسیب زیادی به گیاهان وارد نمی‌کنند، مشروط بر اینکه شرایط عادی به‌زودی بازگردد (Kaur and Asthir, 2017). تحت شرایط تنش، گیاهان ازترکیبات اسمولیتی، سنتز گونه‌های فعال اکسیژن، تولید هورمون‌های تنش و تغییر در مورفولوژی ریشه و اندام هوایی برای تثبیت ساختارهای زیرسلولی و متعادل‌کردن هموستازی سلول استفاده می‌کنند (Chiappero *et al*., 2019; Wang *et al*., 2022). در بررسی انجام‌شده بر بادام‌های پیوندشده روی پایه‌های GF-677 و GN-22، مشخص گردید که تنش خشکی موجب کاهش چشمگیر رنگیزه‌های فتوسنتزی و کاهش کارایی فتوسیستم II در گیاهان می‌شود. همچنین، ارزیابی حساسیت بین ارقام مختلف نشان داد که ارقام شکوفه و سوپرنوا که روی پایه GF-677 پیوند شده بودند، نسبت به سایر ارقام تحمل بیشتری در برابر تنش خشکی از خود نشان دادند (رنجبر و همکاران، ۱۳۹۷).

یکی از راهکارهای مؤثر در کاهش اثرات تنش خشکی، استفاده از اصلاح‌کننده‌هایی است که قابلیت حفظ رطوبت خاک را دارند. بیوچار، به‌عنوان یک ماده کربنی حاصل از پیرولیز پسماندهای آلی، یکی از مؤثرترین گزینه‌ها در این زمینه شناخته می‌شود (Urra *et al*., 2019). ساختار متخلخل، سطح ویژه بالا، ظرفیت تبادل کاتیونی مطلوب و حضور گروه‌های عاملی فعال، بیوچار را به ترکیبی مؤثر در بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک تبدیل کرده است (Atkinson *et al*., 2010; Stewart *et al*., 2012; Van Zwieten *et al*., 2014). بیوچار از طریق بهبود ظرفیت نگهداری آب، رهاسازی تدریجی عناصر غذایی و افزایش کارایی مصرف آب، به افزایش مقاومت گیاه در برابر خشکی کمک می‌کند. همچنین از نظر بیوشیمیایی، با القای تجمع اسمولیت‌هایی نظیر پرولین و کربوهیدرات‌های محلول، تنظیم فشار اسمزی سلول و کاهش آسیب‌های ناشی از تنش را ممکن می‌سازد (Atkinson *et al*., 2010). علاوه‌براین، بیوچار با کاهش نشت الکترولیتی، ارتقاء فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و افزایش غلظت رنگدانه‌های فتوسنتزی، موجب بهبود ظرفیت فتوسنتز و کاهش تنش اکسیداتیو در گیاه می‌شود (Stewart *et al*., 2012; Xu *et al*., 2013; Van Zwieten *et al*., 2014).

امروزه از فناوری نانو در جنبه‌های مختلف کشاورزی به عنوان کود، آفت‌کش، علف‌کش، حشره‌کش، تنظیم‌کننده رشد، نانوحامل‌ها، فیلتراسیون آب و اصلاح خاک استفاده می‌شود (Semida *et al*., 2021; Chandrashekar *et al*., 2023; Wei *et al*., 2025). نانوذرات به‌عنوان ناقل مواد ژنتیکی و پروتئینی در گیاه عمل کرده و نقش مهمی در اصلاح ژنتیکی گیاه و افزایش تحمل آن‌ها در برابر تنش را دارند (Ghorbanpour *et al*., 2020; Chandrashekar *et al*., 2023). نانوذرات باعث افزایش پارامترهای سرعت رشد، جذب دی‌اکسید کربن توسط برگ، زیست‌توده، تنظیم هدایت روزنه‌ای و بهبود پارامترهای فتوسنتزی می‌شوند (Borisev *et al*., 2016; Semida *et al*., 2021). نانوذرات مبتنی بر سیلیکون به عنوان ابزاری امیدوارکننده برای افزایش بهره‌وری محصولات کشاورزی عمل می‌کنند. نانوذرات سیلیکونی نقش مهمی در بهبود جذب مواد مغذی، افزایش تحمل تنش، بهبود جوانه‌زنی بذر، بهبود سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی و افزایش تحمل در برابر بیماری را دارند. استفاده از نانوذره سیلیس به‌طور قابل توجهی پارامترهای فیزیولوژیکی مانند محتوای کلروفیل و زیست‌توده سویا (Wei *et al*., 2025) فعالیت آنتی‌اکسیدانی و متابولیسم اسمولیت‌ها در

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: DOI: 10.22034/15.72.57]

جو (Ghorbanpour *et al.*, 2020) را افزایش داد. نانوذرات سیلیس با تعدیل تنش خشکی در گیاهان از طریق مکانیسم‌های بیوشیمیایی متعددی به بقای گیاه کمک می‌کند. نانوذرات سیلیس نقش مهمی در افزایش رنگدانه‌های فتوسنتزی، تحریک سنتز ترکیبات آنتی‌اکسیدانی آنزیمی و غیرآنزیمی و کاهش آسیب ناشی از رادیکال‌های آزاد برگیاه را دارند (Ma *et al.*, 2015; Guerriero *et al*., 2016; Ebeed *et al*., 2023).

بادام (*Prunus amygdalus* Batsch) از گیاهان متعلق به جنس Prunus و خانواده گل‌سرخیان (Rosaceae) است که به عنوان یکی از مهم‌ترین محصولات آجیلی ایران، نقش بسزایی در اقتصاد کشاورزی کشور ایفا می‌کند. این محصول در سطحی بالغ بر ۱۴۷ هزار هکتار در اقلیم‌های مختلف کشور کشت می‌شود و سالانه حدود ۱۴۰ هزار تن محصول از باغات بادام برداشت می‌گردد (آمارنامه کشاورزی ایران، ۱۴۰۲). یکی از ویژگی‌های برجسته بادام، نیاز آبی نسبتاً کمتر آن در مقایسه با بسیاری از گونه‌های باغی است که این مزیت، آن را به گزینه‌ای مناسب برای کشت در مناطق خشک و نیمه‌خشک تبدیل کرده است. با این حال، پدیده‌های اقلیمی نظیر افزایش دفعات و شدت خشکسالی، همراه با کاهش منابع آب زیرزمینی، تهدیدی جدی برای استمرار تولید این محصول در سال‌های آینده به‌شمار می‌آید (Bakhtiari *et al.*, 2025). تنش خشکی نه تنها بر عملکرد کمی و کیفی بادام تأثیر منفی می‌گذارد، بلکه با ایجاد اختلال در فرآیندهای مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه، پایداری آن را در برابر شرایط بحرانی محیطی کاهش می‌دهد. از این‌رو، شناسایی و به‌کارگیری راهکارهایی که ضمن افزایش تحمل گیاه به خشکی، با اصول کشاورزی پایدار و زیست‌محیطی نیز هم‌راستا باشند، از اولویت‌های تحقیقاتی روز محسوب می‌شود. با وجود شواهد پراکنده، هنوز اطلاعات جامعی در خصوص اثرات توأم کاربرد بیوچار و محلول‌پاشی نانوذره سیلیس بر رشد و عملکرد بادام تحت شرایط تنش خشکی در دست نیست. بر همین اساس، پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر این دو ترکیب بر برخی صفات رشدی نهال‌های بادام رقم شکوفه تحت شرایط تنش خشکی طراحی شده است. نتایج این تحقیق می‌تواند گامی مؤثر در توسعه راهکارهای نوین مدیریت تنش‌های محیطی در باغات بادام باشد.

مواد و روش‌ها

محل و شرایط آزمایش: به منظور ارزیابی تأثیر کاربرد بیوچار، محلول‌پاشی نانوذره سیلیس و تنش کم‌آبیاری بر رشد و برخی صفات فیزیولوژیک دانهال یکساله بادام رقم شکوفه، آزمایشی در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه شهید مدنی آذربایجان شرقی در سال ۱۴۰۲ انجام شد. تناوب نوری گلخانه در طول دوره رشد گیاه به‌صورت ۱۶ ساعت روشنایی و ۸ ساعت تاریکی تنظیم شد. رطوبت نسبی گلخانه ۵۰–۷۰ درصد، و میانگین دمای گلخانه ۲۷ درجه سانتی‌گراد در روز و ۲۰ درجه سانتی‌گراد در شب بود.

طراحی آزمایش و تیمارها: در این پژوهش گیاهان در گلدان‌های ۱۰ لیتری حاوی خاک و تیمار بیوچار سیب (عدم کاربرد بیوچار و ۲۰ گرم در هر کیلوگرم خاک) (وجودی مهربانی و همکاران، ۱۴۰۳) کشت شدند به مشخصات خاک و بیوچار در جدول ۱ اشاره شده است. به‌منظور عادت نمودن گیاهان به شرایط گلخانه، دانهال‌ها به‌مدت یک ماه هر چهار روز یکبار با ۱۰۰۰ سی‌سی آب آبیاری شدند. برای ایجاد یکنواختی در گیاهان، درختان از ارتفاع ۷۰ سانتی‌متری سربرداری شدند. بعد از این مرحله تیمار تنش آبی (آبیاری در حد درصد ظرفیت زراعی، ۵۰ و ۳۰ درصد ظرفیت زراعی) بر گیاه اعمال شد. از دستگاه TDR (Behtab, TDR -100) برای تعیین رطوبت خاک در تیمارهای مختلف کم‌آبیاری استفاده شد. میزان رطوبت خاک در مرحله ظرفیت زراعی ۳۹ درصد (آب حجمی)، در تیمار کم‌آبیاری در ۵۰ درصد ظرفیت زراعی ۱۹ و در کم‌آبیاری در ۳۰ درصد ظرفیت زراعی ۹ درصد (آب حجمی) اندازه‌گیری شد. قبل از هر نوبت آبیاری میزان رطوبت خاک به کمک دستگاه تعیین و سپس اقدام به آبیاری شد. محلول‌پاشی گیاه با نانوذره سیلیس (US Research Nano Materials, Texas, USA) (بدون محلول‌پاشی و ۳ میلی‌گرم

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: DOI: 10.22034/15.72.57]

جدول ۱- مشخصات فیزیکو- شیمیایی خاک و بیوچار مورد استفاده

مشخصات	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)	pH	ماده آلی	فسفر (درصد)	پتاسیم (درصد)	نیتروژن (درصد)	بافت
بیوچار	٤/١	٧/٠	٢/٨	٠/٠٧	–	٠/٥	–
خاک	١/٥	٧/٢	٠/٥٥	٠/٨	٠/٥	٠/٠٦	شنی لومی

در لیتر) (Vojodi Mehrabani *et al.*, 2023) در دو مرحله اعمال شد. مرحله اول همزمان با اعمال تنش خشکی و محلول‌پاشی مرحله دوم ۱۵ روز بعد تکرار شد (سردارلو و همکاران، ١٤٠٤). گیاهان به‌مدت چهار ماه در گلخانه نگهداری شدند و در پایان روز ۱۲۰ نمونه‌گیری از گیاهان انجام شد.

اندازه‌گیری وزن گیاه: برای محاسبه وزن خشک ریشه و اندام هوایی گیاه، نمونه‌ها در آون در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۷۲ ساعت خشک شده و وزن خشک نمونه‌ها با استفاده از ترازوی دیجیتال (Germany, Boeco, BBI41) محاسبه شد.

پراکسید هیدروژن: ۰/۲ گرم از برگ بادام در نیتروژن مایع سائیده شد و روی آن، ۵ میلی‌لیتر اسید تری‌کلرو استیک یک درصد حجمی اضافه شد. محلول حاصل به‌مدت ۱۵ دقیقه در ۱۲۰۰۰ شتاب گرانشی سانتریفیوژ (Hitachi, Kubota, Japan)، و سپس ۰/۵ میلی‌لیتر از فاز رویی، با ۰/۵ میلی‌لیتر بافر فسفات ۱۰ میلی‌مولار (اسیدیته ۷/۵) و یک میلی‌لیتر یدید پتاسیم (یک مولار) مخلوط شد. جذب نمونه‌ها در ۳۹۰ نانومتر به وسیله دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری گردید (Nareshkumar *et al.*, 2015).

مالون دی‌آلدئید: ۰/۲ گرم از نمونه‌های برگی بادام در نیتروژن مایع سائیده شد و روی آن ۵ میلی‌لیتر اسید تری‌کلرو استیک یک درصد حجمی اضافه شد. محلول حاصل به‌مدت ۱۵ دقیقه در ١٢٠٠٠g سانتریفیوژ، و یک میلی‌لیتر از محلول رویی با ٤ میلی‌لیتر از مخلوط اسید تیوباربیتوریک (۵ درصد) + اسید تری‌کلرو استیک (۲۰ درصد) مخلوط شد و به‌مدت ۳۰ دقیقه گرم شد. بعد از این مرحله، نمونه‌ها روی یخ قرار داده شد تا فعالیت آنزیم متوقف شود. در مرحله بعد، مخلوط به‌مدت ۵ دقیقه در ۱۰۰۰۰ شتاب گرانشی سانتریفیوژ و جذب نمونه‌ها توسط اسپکتروفتومتر (T80+, China) در ۵۳۲ و ٦٠٠ نانومتر اندازه‌گیری شد (Heath and Packer, 1968).

پرولین: ۰/۲ گرم نمونه برگی بادام در نیتروژن مایع سائیده شد. روی نمونه سائیده‌شده ۵ میلی‌لیتر اسید سولفوسالسیلیک ۳ درصد اضافه، و عصاره حاصل به‌مدت ۷ دقیقه، با سرعت ٦٠٠٠ دور در دقیقه سانتریفیوژ، سپس، فاز مایع جدا شد. یک میلی‌لیتر از محلول رویی با همان حجم اسید نین‌هیدرین و یک میلی‌لیتر اسید گلاسیال مخلوط شد. نمونه‌ها همراه با محلول‌های استاندارد پرولین به‌مدت یک ساعت در حمام آب در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. بعد از یک ساعت نمونه‌ها بلافاصله به حمام یخ به‌مدت ۵ دقیقه منتقل شدند. بعد از خارج‌کردن نمونه‌ها از حمام یخ، روی آن‌ها ۲ میلی‌لیتر تولوئن اضافه و به‌مدت ۳۰ ثانیه تکان داده شد. در مرحله نهایی، نمونه‌ها ۳۰ دقیقه در وضعیت سکون قرار گرفتند. بعد از تشکیل فاز قرمز محتوای پرولین اندازه‌گیری گردید (Fedina *et al.*, 2006).

محتوای مواد جامد محلول: از رفرکتومتر دستی (Erma, Tokio, Japan) برای اندازه‌گیری محتوای مواد جامد محلول برگ بادام استفاده شد.

آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی: برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (کاتالاز و سوپراکسید دیسیموتاز) ابتدا ۰/۵ گرم برگ تازه با یک میلی‌لیتر بافر فسفات pH ۷ به‌مدت ۵ دقیقه در دمای ٤ درجه سانتی‌گراد با ١٤٠٠٠ دور سانتریفیوژ شد. از محلول روشناور برای اندازه‌گیری آنزیم‌ها استفاده شد. برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم کاتالاز، ۵ میکرولیتر از عصاره آنزیمی با ٤٩٥ میکرولیتر بافر فسفات پتاسیم حاوی ۰/۱

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: DOI: 10.22034/15.72.57]

میلی‌مولار EDTA و ۱۰ میلی‌مولار پراکسید هیدروژن مخلوط شد و منحنی تغییرات در ۴۲۵ نانومتر ثبت شد. فعالیت آنزیمی به‌صورت تغییرات جذب بر زمان در طول‌موج ۲۴۰ نانومتر به کمک دستگاه اسپکتروفتومتر (T80+, China) در مدت یک دقیقه ثبت گردید (Luhova *et al.*, 2003). برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز، ۳ میلی‌لیتر مخلوط واکنش حاوی بافر فسفات پتاسیم ۵۰ میلی‌مولار pH ۷/۸، نیتروبلو تترازولیوم ۷۵ میکرومولار، متیونین ۱۳ میلی‌مولار، EDTA ۰/۱ میکرومولار، ریبوفلاوین ۲۰ میکرومولار و ۱۰۰ میکرولیتر عصاره آنزیم باهم مخلوط گردید. نمونه‌های حاوی آنزیم به‌مدت ۱۵ دقیقه در مقابل نور ۵۰۰ لوکس قرار گرفت. سپس جذب نمونه‌ها در ۵۶۰ نانومتر به کمک دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد (Giannopolitis and Ries, 1977).

محتوای کلروفیل: ۰/۵ گرم از برگ بادام در هاون چینی با نیتروژن مایع ساییده شد و سپس ۲۰ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد روی آن اضافه و ۱۰ دقیقه در ۶۰۰۰ دور سانتریفیوژ شد. جذب عصاره در طول‌موج‌های ۶۴۵ و ۶۶۵ نانومتر با استفاده از اسپکتروفتومتر (T80$^+$, China) اندازه‌گیری شد (Lutts *et al.*, 1995).

$$\text{Chlorophyll a} = (19.3 \times A663 - 0.863 \times A665)\ V / 100W$$
$$\text{Chlorophyll b} = (19.3 \times A645 - 3.6 \times A663)\ V / 100W$$

V حجم محلول صاف‌شده، W وزن تر نمونه و A جذب نور در طول‌موج‌های ۶۴۵ و ۶۶۵ نانومتر است.

محتوای آب نسبی برگ (RWC): ابتدا وزن یک قطعه از برگ بادام اندازه‌گیری شد (FW). سپس نمونه داخل آب‌مقطر به‌مدت چهار ساعت در یخچال قرار گرفت. بعد از خروج از یخچال و حذف آب اضافی با کاغذ خشک‌کن، وزن آماس آن تعیین شد (TW). سپس نمونه‌ها به‌مدت ۴۸ ساعت در آون (Panasonic, Yamato, Japan) در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت، تا وزن خشک محاسبه شود (DW). محتوای آب نسبی برگ از رابطه زیر محاسبه شد (Chartzoulakis *et al.*, 2002).

$$RWC\ (\%) = [(FW-DW) / (TW-DW)] \times 100$$

غلظت عناصر غذایی: ابتدا نمونه‌های برگ از گیاه جدا شد و بعد از شستشو در آب‌مقطر و حذف گرد و غبار روی برگ، نمونه‌ها در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد در آون (Yamato, Panasonic, Japan) خشک شد. یک گرم از برگ خشک‌شده بادام در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد در کوره الکتریکی (Japan Yamato Scientific,) به‌مدت چهار ساعت قرار گرفت تا به خاکستر تبدیل شود. به هر نمونه، ۲۰ میلی‌لیتر اسید نیتریک یک نرمال اضافه شد و نمونه‌ها به دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد در حمام آب گرم منتقل شدند تا اسید تبخیر شود و در مرحله آخر، آب‌مقطر دوبار تقطیر به نمونه‌ها اضافه و حجم نمونه‌ها به ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد و سپس مقدار عناصر محاسبه شد. محتوای نیتروژن به روش کجلدال، فسفر به‌روش رنگ‌سنجی کالریمتریک (رنگ زرد مولیبدات وانادات)، پتاسیم به‌وسیله دستگاه فلیم فتومتری (England, 410, Corning) و کلسیم به وسیله دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد (AOAC, 1990).

تجزیه و تحلیل آماری: از آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار برای تجزیه داده‌ها استفاده شد. برررسی حاضر دارای سه تکرار و ۱۲ تیمار (سه سطح تنش کم‌آبیاری، دو سطح بیوچار و دو سطح محلول‌پاشی با نانوذره) بود. هر واحد آزمایشی از یک گلدان حاوی یک گیاه تشکیل شده بود. آنالیز داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار MSTAC نسخه ۲/۱ و SAS نسخه ۹/۱ انجام شد. مقایسه میانگین داده‌ها با کمک آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

نتایج

ارزیابی صفات مرفولوژیک، ارتفاع: تیمارهای آبیاری در ۱۰۰ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی در شرایط کاربرد بیوچار و محلول‌پاشی با نانوذره منجر به افزایش ارتفاع گیاه شد. کاهش معنی‌دار در ارتفاع گیاه در تیمار آبیاری در ۳۰ درصد ظرفیت زراعی در شرایط بدون کاربرد بیوچار و هر دو سطح محلول‌پاشی مشاهده شد که نشان‌دهنده تأثیر منفی تنش بر گیاه بود (جدول ۳).

وزن تر و خشک بخش ریشه و اندام هوایی: نتایج حاصل از جدول تجزیه واریانس نشان داد که وزن خشک ریشه و

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: DOI: 10.22034/15.72.57]

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر بیوچار خاک، محلول‌پاشی نانوذره سیلیس و تنش کم‌آبیاری بر شاخص‌های رشدی نهال بادام رقم شکوفه

منابع تغییرات	درجه آزادی	وزن خشک ریشه	وزن خشک اندام هوایی	ارتفاع گیاه
کم‌آبیاری (A)	۲	۱۲۱ ns	۲/۶۱**	۰/۷۸**
بیوچار (B)	۱	۱۶۱**	۲/۷**	۴/۳**
A×B	۲	۱۵۳**	۱/۳**	۰/۵۶**
محلول‌پاشی (C)	۱	۱۰۱ns	۱/۰۲ ns	۰/۸۸**
A×C	۲	۷۵**	۰/۲۳ns	۰/۲۵**
B×C	۱	۳۴*	۰/۲۴ns	۰/۲۷*
A×B×C	۲	۶۲**	۱/۸۹**	۰/۳۴**
اشتباه آزمایشی	۲۴	۲/۹	۰/۹۴	۰/۱۲
ضریب تغییرات (٪)		۵/۲	۷/۰	۸/۷

ns، *و **به ترتیب عدم اختلاف معنی‌دار و اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد هستند.

جدول ۳- مقایسه میانگین اثرات متقابل بیوچار خاک، محلول‌پاشی نانوذره سیلیس و تنش کم‌آبیاری بر شاخص‌های رشدی و محتوای کلروفیل نهال بادام رقم شکوفه

تنش کم‌آبیاری	بیوچار (۲۰ گرم به کیلوگرم)	محلول‌پاشی (میلی‌گرم بر لیتر)	وزن خشک ریشه (گرم به گلدان)	وزن خشک بخش هوایی (گرم به گلدان)	ارتفاع گیاه (سانتی‌متر)
۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی	بدون بیوچار	۰	۱۱/۴ ±۰/۰۱c	۱۰۴ ±۰/۹۱c	۴۹ ±۰/۰۳c
	بدون بیوچار	۳	۱۲/۷ ±۰/۰۷b	۱۰۵ ±۰/۱۱b	۴۹ ±۰/۰۲۱c
	با بیوچار	۰	۱۳/۵ ±۰/۰۰ab	۱۱۵ ±۰/۲a b	۵۳ ±۰/۰۴۵ b
	با بیوچار	۳	۱۴/۵ ±۰/۲۱a	۱۱۶ ±۰/۵۵a	۶۱ ±۰/۹۶a
۵۰ درصد ظرفیت زراعی	بدون بیوچار	۰	۱۱/۴ ±۰/۴۱c	۱۰۳ ±۰/۲۱d	۴۸ ±۰/۱۷c
	بدون بیوچار	۳	۱۱/۶ ±۰/۰۸b	۱۰۵ ±۰/۰۱b	۴۹ ±۰/۱۹c
	با بیوچار	۰	۱۳ ±۰/۰۴ab	۱۱۵ ±۰/۹a	۵۱ ±۰/۰۱۱b
	با بیوچار	۳	۱۳/۵ ±۰/۰۹ab	۱۱۵ ±۰/۸۷ a	۵۹ ±۰/۰۹ab
۳۰ درصد ظرفیت زراعی	بدون بیوچار	۰	۱۰/۳ ±۰/۱۴de	۱۰۳ ±۰/۶۱e	۴۲ ±۰/۲۴d
	بدون بیوچار	۳	۱۰/۳ ±۰/۲۱c	۱۰۴ ±۰/۵۸c	۴۴ ±۰/۳۱d
	با بیوچار	۰	۱۰/۴ ±۰/۰۶c	۱۱۰ ±۰/۳۶b	۴۹ ±۰/۶۴c
	با بیوچار	۳	۱۱/۴ ±۰/۰۵b	۱۱۱ ±۰/۶۳ b	۴۹ ±۰/۷۱ c

میانگین‌هایی با حروف مشترک در هر ستون فاقد اختلاف معنی‌دار آماری بر اساس آزمون LSD (P≤0.05) هستند.

اندام هوایی گیاه تحت‌تأثیر اثر متقابل تیمارهای آزمایشی قرار گرفت (جدول ۲). تنش خشکی در شرایط بدون محلول‌پاشی و بدون کاربرد بیوچار منجر به کاهش وزن گیاه شد. تیمارهای آبیاری در ۱۰۰ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی همراه با کاربرد بیوچار در شرایط بدون محلول‌پاشی و محلول‌پاشی با نانوذره سیلیس منجر به افزایش وزن خشک ریشه و اندام هوایی گیاه

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: DOI: 10.22034/15.72.57]

جدول ٤- تجزیه واریانس تأثیر بیوچار خاک، محلول‌پاشی با نانوذره سیلیس و تنش کم‌آبیاری بر صفات بیوشیمیایی نهال بادام رقم شکوفه

منابع تغییرات	درجه آزادی	پراکسید هیدروژن	مالون دی‌آلدئید	پرولین	مواد جامد محلول	کاتالاز	سوپراکسید دیسموتاز
کم‌آبیاری (A)	۲	۱۵٤۳**	۳/۰٤**	۱۲۳٤**	۱/۳**	۳۵۷**	٥٦۲**
بیوچار (B)	۱	٥٤۷**	۲/۹**	۱٥۳**	۱۲/۸**	٥٦۲ *	۲۷۱**
A×B	۲	۳۳ ^{ns}	۱/۰ ^{ns}	۲۸۹**	۰/۱۱ ^{ns}	۹۱*	۱٥٤**
محلول‌پاشی (C)	۱	۱۸۹**	۲/٥**	٦٥**	۰/۱۷^{ns}	٥٤ ^{ns}	۸۱*
A×C	۲	۱۳ ^{ns}	۰/۲۸^{ns}	۷۸**	۰/۱۰ ^{ns}	۸/۲ ^{ns}	۱٤ ^{ns}
B×C	۱	٤۲^{ns}	۰/٥٤^{ns}	۲/۱^{ns}	۰/۱۳^{ns}	۱۲۳*	۲۳ ^{ns}
A×B×C	۲	۲۱^{ns}	۰/۸۹ ^{ns}	۱۲۳**	۰/۱۱ ^{ns}	۷٤**	۱۳۱*
اشتباه آزمایشی	۲٤	۳۱	۱/۰۱	٦/۱	۰/۲٥	۱٤	۷/۸
ضریب تغییرات (٪)		٥/۳	٦/٥	۳/٤	٦/۷	۷/۱	٥/٤

^{ns}، *و **به ترتیب عدم اختلاف معنی‌دار و اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد هستند.

جدول ۵- مقایسه میانگین تأثیر تنش کم‌آبیاری بر محتوای پراکسید هیدروژن و مالون دی‌آلدئید نهال بادام رقم شکوفه

کم‌آبیاری	محتوای پراکسید هیدروژن (میلی‌مول بر کیلوگرم)	محتوای مالون دی‌آلدئید (میلی‌مول بر کیلوگرم)
ظرفیت زراعی	۲٦±۰/۲٤^{c}	۱۹ ±۰/۳۹^{c}
٥۰ درصد ظرفیت زراعی	٥٤ ±۰/۳۱^{b}	۳۱±۰/٤۱^{b}
۳۰ درصد ظرفیت زراعی	٦۷±۰/۲۸^{a}	٤۷±۱/۰ ^{a}

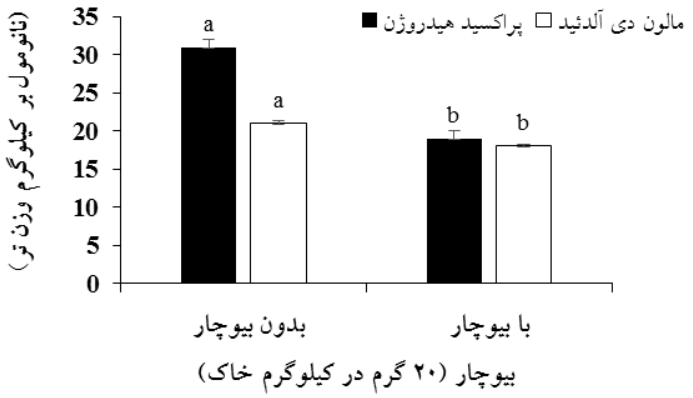
میانگین‌هایی با حروف مشترک در هر ستون فاقد اختلاف معنی‌دار آماری بر اساس آزمون LSD ($P\leq0.05$) هستند.

شد (جدول ۳).

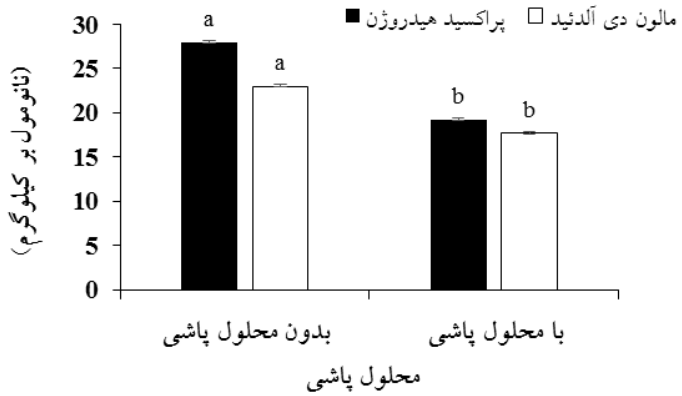
ارزیابی صفات بیوشیمیایی گیاه، محتوای مالون دی‌آلدئید و پراکسید هیدروژن: اثرات مستقل تیمارهای آزمایشی به‌طور معناداری محتوای مالون دی‌آلدئید و پراکسید هیدروژن در بافت‌های گیاهی را تحت تأثیر قرار دادند (جدول ٤). با افزایش شدت تنش خشکی، به‌ویژه در شرایط آبیاری تا ۳۰ درصد ظرفیت زراعی، میزان پراکسید هیدروژن و مالون دی‌آلدئید به ترتیب به میزان ۱۵۷ و ۱٤۷ درصد نسبت به تیمار شاهد (آبیاری در حد ظرفیت زراعی) افزایش یافت (جدول ۵). استفاده از بیوچار (شکل ۱) و محلول‌پاشی نانوذرات سیلیس (شکل ۲) به‌طور چشمگیری موجب کاهش محتوای هر دو ترکیب اکسیداتیو نسبت به، شرایط بدون کاربرد آن‌ها گردید. به‌طوری‌که کاربرد بیوچار منجر به کاهش ۳٦ درصدی مالون دی‌آلدئید و ۱٤ درصدی پراکسید هیدروژن شد، درحالی‌که محلول‌پاشی نانوذرات سیلیس باعث کاهش ۲٤ درصدی مالون دی‌آلدئید و ۲۱ درصدی پراکسید هیدروژن نسبت به شرایط شاهد بدون محلول‌پاشی گردید.

محتوای پرولین و مواد جامد محلول: اثر متقابل تیمارهای آزمایشی بر محتوای پرولین و نیز اثر مستقل تنش خشکی و کاربرد بیوچار بر محتوای مواد جامد محلول گیاه معنادار بود (جدول ٤). تیمار آبیاری در ۳۰ درصد ظرفیت زراعی، چه در شرایط کاربرد و چه عدم کاربرد بیوچار و همچنین در حضور یا عدم حضور محلول‌پاشی، منجر به افزایش ۵۱ درصدی محتوای پرولین نسبت به تیمار شاهد گردید (جدول ٦). تنش

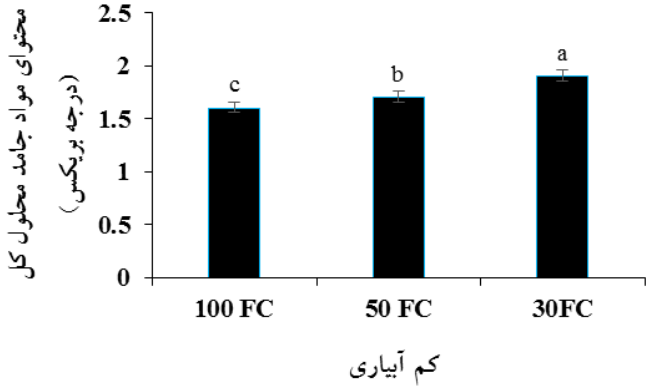
[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: DOI: 10.22034/15.72.57]



شکل ۱- مقایسه میانگین اثر بیوچار خاک بر محتوای پراکسید هیدروژن و مالون دی‌آلدیئد نهال بادام رقم شکوفه. میانگین‌هایی با حروف مشترک در هر ستون فاقد اختلاف معنی‌دار آماری بر اساس آزمون LSD (P≤0.05) هستند.



شکل ۲- مقایسه میانگین تأثیر محلول‌پاشی نانوذره سیلیس بر محتوای پراکسید هیدروژن و مالون دی‌آلدئید نهال بادام رقم شکوفه. میانگین‌هایی با حروف مشترک در هر ستون فاقد اختلاف معنی‌دار آماری بر اساس آزمون LSD (P≤0.05) هستند.



شکل ۳- مقایسه میانگین تأثیر کم‌آبیاری بر محتوای مواد جامد محلول کل نهال بادام رقم شکوفه. FC: نشان‌دهنده ظرفیت زراعی است. میانگین‌هایی با حروف مشترک در هر ستون فاقد اختلاف معنی‌دار آماری براساس آزمون LSD (P≤0.05) هستند.

خشکی نیز تأثیر مثبت و معنی‌داری بر افزایش محتوای مواد جامد محلول داشت، و آبیاری در ۳۰ درصد ظرفیت زراعی، موجب افزایش ۱۹ درصدی محتوای مواد جامد محلول نسبت به شاهد (۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) شد (شکل ۳). از سوی

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: DOI: 10.22034/15.72.57]

شکل ٤- مقایسه میانگین تأثیر بیوچار بر محتوای مواد جامد محلول نهال بادام رقم شکوفه. میانگین‌هایی با حروف مشترک در هر ستون فاقد اختلاف معنی‌دار آماری براساس آزمون LSD (P≤0.05) هستند.

جدول ٦- مقایسه میانگین اثرات متقابل بیوچار خاک، محلول‌پاشی نانوذره سیلیس و تنش کم‌آبیاری بر صفات بیوشیمیایی نهال بادام رقم شکوفه

تنش کم‌آبیاری	بیوچار	محلول‌پاشی	پرولین	کاتالاز	سوپراکسید دیسموتاز
	(۲۰ گرم به کیلوگرم)	(میلی‌گرم در لیتر)	(ماکروگرم بر گرم وزن تر)	(ماکرومول بر گرم پروتئین)	
۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی	بدون بیوچار	۰	۱۰/۳±۰/۲۳^{g}	۱۰±۰/۱۱^{e}	۲۷±۰/۱۸^{d}
	بدون بیوچار	۳	۱۱/۲±۰/۳۱^{f}	۹/٦±۰/۰۵^{f}	۲۸±۰/۲۳^{c}
	بابیوچار	۰	۱۰/۷±۰/۱۱^{fg}	۱۱/۳±۰/۰٦^{d}	۲۹±۰/۱۲^{c}
	بابیوچار	۳	۱۲/۱±۰/۱۰^{e}	۱٤/۲±۰/۰۹^{b}	۳۱±۰/۱۱^{b}
۵۰ درصد ظرفیت زراعی	بدون بیوچار	۰	۱۳/٤±۰/۰٦^{d}	۱۱/۳±۰/۰۱^{d}	۲۹±۰/۲۱^{c}
	بدون بیوچار	۳	۱۳/٦±۰/۰۱^{d}	۱۲±۰/۰۸^{c}	۳۰±۰/۳٤^{b}
	بابیوچار	۰	۱٤/۲±۰/۳۱^{b}	۱۱/۷±۰/۳٤^{d}	۲۸±۰/۵۱^{b}
	بابیوچار	۳	۱٤/۸±۰/٤۱^{b}	۱۳/۳±۰/۱۹^{b}	۲٦±۰/٤۲^{b}
۳۰ درصد ظرفیت زراعی	بدون بیوچار	۰	۱٤/۹±۰/۱۱^{ab}	۱٤/۸±۰/۱٤^{ab}	۳٤±۰/۲۱^{a}
	بدون بیوچار	۳	۱٤/۹±۰/۰۹^{ab}	۱٤/۷±۰/۲۱^{a}	۳۵±۰/۰۹^{a}
	بابیوچار	۰	۱۵/۱±۰/۵۱^{a}	۱٤/۹±۰/۳۵^{a}	۳۳±۰/۰٦^{a}
	بابیوچار	۳	۱۵/٦±۰/۰۳^{a}	۱۵/٤±۰/٦۵^{a}	۳٤±۰/۱۸^{a}

میانگین‌هایی با حروف مشترک در هر ستون فاقد اختلاف معنی‌دار آماری بر اساس آزمون LSD (P≤0.05) هستند.

دیگر، اثر مستقل محلول‌پاشی تأثیر معنی‌داری بر محتوای مواد جامد محلول نشان نداد (جدول ٤)، اما کاربرد بیوچار منجر به افزایش ۱۷ درصدی این صفت نسبت به شرایط بدون بیوچار شد (شکل ٤).

فعالیت آنزیم کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز: اثر متقابل تیمارهای آزمایشی فعالیت آنزیم‌های مورد مطالعه را تحت‌تأثیر قرار داد (جدول ٤). آبیاری در ۳۰ درصد ظرفیت زراعی در شرایط کاربرد بیوچار و عدم کاربرد آن و هر دو سطح محلول‌پاشی با نانوذره سیلیس محتوای پراکسید هیدروژن و مالون دی‌آلدئید را تحت‌تأثیر قرارداد. براساس نتایج حاصل با

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: DOI: 10.22034/15.72.57]

جدول ۷- تجزیه واریانس تأثیر بیوچار خاک، محلول‌پاشی نانوذره سیلیس و تنش کم‌آبیاری بر صفات فیزیولوژیک نهال بادام رقم شکوفه

منابع تغییرات	درجه آزادی	کلروفیل a	کلروفیل b	RWC	نیتروژن	پتاسیم	فسفر	کلسیم
کم‌آبیاری (**A**)	۲	۱٤٤**	۷۸**	٤۸۹**	٦۹**	٤٥٦۷**	۱۷۸**	۱٤۸٥**
بیوچار (B)	۱	۱۰٤^{ns}	٦٥*	۳۰۲*	۷۸**	٦٤٥**	۹٦**	۱٤٥**
A×B	۲	۱۳^{ns}	۱۳^{ns}	٤/۱^{ns}	٦/۸*	۷۷**	۷۸**	٦٥**
محلول‌پاشی (C)	۱	۲٤۷*	۸۷**	۱۰^{ns}	٦۱^{ns}	۲٥٤**	۳۲^{ns}	۲۹*
A×C	۲	۹/۸^{ns}	٥٦*	۱/٥^{ns}	۰/۸۷^{ns}	۳/۳^{ns}	۱۹^{ns}	۱۸**
B×C	۱	۲۲^{ns}	۱٦^{ns}	۲۱^{ns}	۱۲*	۲/۸^{ns}	۱۱^{ns}	12**
A×B×C	۲	۹۸**	۱۲۱**	۹/۳^{ns}	۹٦*	۱٥٤**	۲۹**	۱٥/۸*
اشتباه آزمایشی	۲٤	۱٤	۹/۹	۱۳	۰/٤۷	۳/۸	۱/۸	۲/٥
ضریب تغییرات (٪)		٥/٦	۸/۹	۸/۱	۳/۸	٥/٦	٤/٦	۲/۳

^{ns}، *و **به ترتیب عدم اختلاف معنی‌دار و اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد هستند.

جدول ۸- مقایسه میانگین اثرات متقابل بیوچار خاک، محلول‌پاشی نانوذره سیلیس و تنش کم‌آبیاری بر محتوای عناصر نهال بادام رقم شکوفه

تنش کم‌آبیاری	بیوچار (۲۰ گرم به کیلوگرم خاک)	محلول‌پاشی (میلی‌گرم بر لیتر)	کلروفیل a (میلی‌گرم بر گرم وزن تر)	کلروفیل b (میلی‌گرم بر گرم وزن تر)	نیتروژن (درصد)	فسفر (میلی‌گرم بر گروم وزن خشک)	پتاسیم (میلی‌گرم بر گروم وزن خشک)	کلسیم (میلی‌گرم بر گروم وزن خشک)
	بدون بیوچار	۰	۳/۱ ±۰/۰۸^{d}	۱/۳±۰/۰٤^{e}	۱٤±۰/۱٥^{cd}	۰/۳۷±۰/۰۱^{c}	۱٦/۸±۰/۱٤^{b}	۳/۰±۰/۰٥^{d}
۱۰۰ درصد	بدون بیوچار	۳	۳/۳ ±۰/۰٤^{c}	۱/٤ ±۰/۰۸^{d}	۱٤/۷±۰/۱۱^{c}	۰/۳۸±۰/۰۹^{c}	۱٦/۹±۰/۱۷^{b}	٤/۲±۰/۰۱^{b}
ظرفیت زراعی	با بیوچار	۰	٥/۲±۰/۰۷^{ab}	۲/۱ ±۰/۱۰^{ab}	۱٥/۱±۰/۳۳^{b}	۰/٤٦±۰/۰۱^{ab}	۱۷/۱±۰/۱۲^{ab}	۳/۳±۰/۰۹^{cd}
	با بیوچار	۳	٥/٦ ±۰/۰۰^{a}	۲/٥±۰/۰۹^{a}	۱٦/۸±۰/۲٥^{a}	۰/٤۹±۰/۱۲^{a}	۱۷/٤±۰/۳۸^{a}	٤/۹±۰/۱۷^{a}
	بدون بیوچار	۰	۳/۰ ±۰/۳۸^{d}	۱/۱ ±۰/۲۱^{e}	۱۲/٦±۰/۷٤^{f}	۰/۳۱±۰/۰۷^{cd}	۱٦±۰/٥٦^{d}	۲/۷±۰۳^{e}
۵۰ درصد ظرفیت	بدون بیوچار	۳	۳/۲±۰/۲۱^{d}	۱/۳±۰/۱۱^{d}	۱۳/۲±۰/٤٤^{e}	۰/٤۰±۰/۰٦^{b}	۱٦/٥±۰/٤۱^{c}	۳/۱±۰/۲۱^{d}
زراعی	با بیوچار	۰	٥/۰ ±۰/۱۹^{ab}	۱/٦ ±۰/۰۸^{c}	۱٤/۷±۰/۳٥^{c}	۰/٤۳±۰/۰۰^{ab}	۱٦/۹±۰/۲۲^{ab}	۳/۲±۰/۳۳^{cd}
	با بیوچار	۳	٥/٤ ±۰/۱٥^{a}	۲/۰ ±۰/۰۱^{b}	۱٥/۱±۰/۱٦^{b}	۰/٤٤±۰/۰۱^{ab}	۱۷/۱±۰/۲۱^{a}	٤/۱±۰/٥۱^{b}
	بدون بیوچار	۰	۲/۹ ±۰/۰۱^{e}	۰/۹ ±۰/۰۰^{f}	۱۰/۹±۰/۲٥^{g}	۰/۲۱ ±۰/۱۱^{e}	۱٥/۹ ±۰/۱۹^{e}	۲/٥±۰/۰٦^{e}
۳۰ درصد ظرفیت	بدون بیوچار	۳	۱/۲ ±۰/۱۲^{f}	۱/۲ ±۰/۰۹^{e}	۱۲/۳±۰/۱٥^{f}	۰/۲۳±۰/۰٤^{d}	۱٦/۰±۰/۰٦^{d}	۳/۰ ±۰/۱٤^{d}
زراعی	با بیوچار	۰	۳/٤ ±۰/۰۹^{c}	۱/۳±۰/۰٦^{d}	۱٤/۲±۰/۳۱^{cd}	۰/۲۸±۰/۰۱^{d}	۱٦/۳ ±۰/٥۱^{c}	۳/۱ ±۰/۰۲^{cd}
	با بیوچار	۳	٤/٤ ±۰/۰٤^{b}	۱/۸±۰/۰۰^{bc}	۱٤/۹±۰/۲۲^{c}	۰/۳±۰/۰۰^{cd}	۱٦/٦±۰/٦۲^{bc}	۳/٦±۰/٤۳^{c}

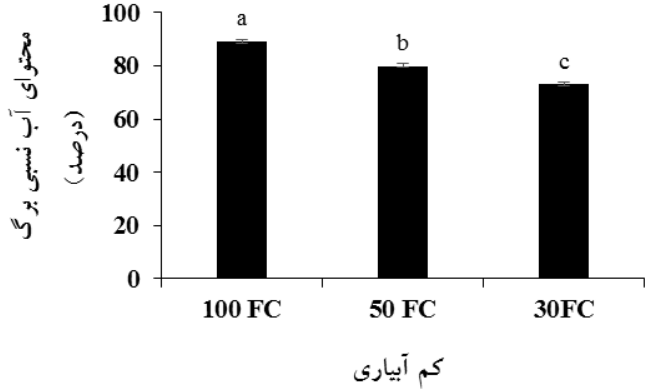
میانگین‌هایی با حروف مشترک در هر ستون فاقد اختلاف معنی‌دار آماری براساس آزمون LSD (P≤0.05) هستند.

افزایش تنش خشکی به ۵۰ درصد ظرفیت زراعی از محتوای اکسید هیدروژن ۱۵۸ درصد و مالون دی‌آلدئید ۱۴۷ درصد نسبت‌به شرایط آبیاری در مرحله ظرفیت زراعی افزوده شد. محلول‌پاشی با سیلیس موجب کاهش ۳۱ درصدی پراکسید هیدروژن و ۲۴ درصدی محتوای مالون دی‌آلدئید نسبت به شاهد شد. کاربرد بیوچار نیز تأثیر مثبت در کاهش محتوای هر دو ترکیب در گیاه را داشت (جدول ٦).

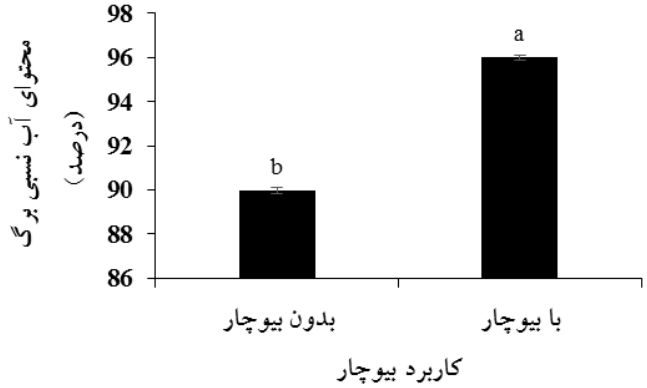
ارزیابی صفات فیزیولوژیکی، محتوای کلروفیل: اثر

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: DOI: 10.22034/15.72.57]



شکل ۵- مقایسه میانگین تنش کم‌آبیاری بر محتوای نسبی آب برگ نهال بادام رقم شکوفه. FC: نشان‌دهنده ظرفیت زراعی است. میانگین‌هایی با حروف مشترک در هر ستون فاقد اختلاف معنی‌دار آماری براساس آزمون LSD (P≤0.05) هستند.



شکل ٦- مقایسه میانگین اثر بیوچار خاک بر محتوای نسبی آب برگ نهال بادام رقم شکوفه. میانگین‌هایی با حروف مشترک در هر ستون فاقد اختلاف معنی‌دار آماری براساس آزمون LSD (P≤0.05) هستند.

متقابل تیمارهای آزمایشی محتوای کلروفیل a و b گیاه را تحت‌تأثیر قرارداد (جدول ۷). آبیاری در ۱۰۰ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی در شرایط کاربرد بیوچار و در شرایط محلول‌پاشی با نانوذره و عدم محلول‌پاشی به ارتقای محتوای کلروفیل a در گیاه کمک کرد. محتوای کلروفیل b در تیمار آبیاری در حد ظرفیت زراعی همراه با کاربرد بیوچار در شرایط عدم محلول‌پاشی و محلول‌پاشی با نانوذره افزایش یافت. محتوای کلروفیل a و b در تیمار آبیاری در ۳۰ درصد ظرفیت زراعی در شرایط عدم کاربرد بیوچار و هر دو سطح محلول‌پاشی به کمترین میزان خود رسید که نشان‌دهنده تأثیر منفی تنش بر گیاه بود. در هر سطح تنش آبی استفاده از بیوچار همراه با تیمارهای محلول‌پاشی به بهبود صفات مورد مطالعه نسبت به شرایط عدم کاربرد بیوچار کمک کرد (جدول ۸).

محتوای نسبی آب گیاه: اثر مستقل تیمار آبیاری و کاربرد بیوچار محتوای نسبی آب گیاه را تحت‌تأثیر قرارداد (جدول ۷). براساس نتایج بدست آمده با افزایش تنش خشکی به ۵۰ و ۳۰ درصد ظرفیت زراعی به‌ترتیب به میزان ۱۰ و ۱۸ درصد از محتوای نسبی آب گیاه نسبت به شرایط عدم حضور تنش کاسته شد (شکل ۵). کاربرد بیوچار نیز موجب افزایش محتوای نسبی آب به‌میزان ۷ درصد نسبت‌به شرایط عدم کاربرد آن شد (شکل ٦).

محتوای عناصر نیتروژن، فسفر، پتاسیم و کلسیم: محتوای عناصر تحت‌تأثیر اثرات متقابل تیمارهای آزمایشی قرار گرفت (جدول ۷). آبیاری در ۵۰ و ۳۰ درصد ظرفیت زراعی تأثیر

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: DOI: 10.22034/15.72.57]

منفی بر محتوای نیتروژن و کلسیم گیاه در شرایط کاربرد و عدم کاربرد بیوچار و محلول‌پاشی را داشت. بالاترین درصد نیتروژن و کلسیم در تیمار بدون تنش خشکی × کاربرد بیوچار × محلول‌پاشی نانوذره مشاهده شد که نشان‌دهنده افزایش ۲۰ درصدی محتوای نیتروژن و ۶۳ درصدی محتوای کلسیم نسبت‌به شاهد (آبیاری در مرحله ظرفیت زراعی × بدون بیوچار × بدون محلول‌پاشی) بود. محتوای فسفر و پتاسیم در تیمارهای آبیاری در مرحله ظرفیت زراعی × کاربرد بیوچار × محلول‌پاشی نانوذره سیلیس و تیمارهای آبیاری در ۵۰ درصد ظرفیت زراعی × کاربرد بیوچار × محلول‌پاشی (صفر و ۳ گرم در لیتر) افزایش یافت. کمترین محتوای هر دو عنصر در تیمار آبیاری در ۳۰ درصد ظرفیت زراعی × بدون کاربرد بیوچار × بدون محلول‌پاشی مشاهده شد. روند نزولی در محتوای کلسیم در تنش‌های کم‌آبیاری در ۵۰ و ۳۰ درصد ظرفیت زراعی در شرایط بدون کاربرد بیوچار و عدم محلول‌پاشی مشاهده شد (جدول ۸).

بحث

عوامل زیستی و غیرزیستی، به‌ویژه تنش خشکی، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده رشد و عملکرد گیاه به‌دلیل کاهش تقسیم و رشد سلول شناخته می‌شوند. آب یکی از اجزای مهم تشکیل‌دهنده گیاهان غیرچوبی است که حدود ۸۰-۹۵ درصد وزن تر گیاه را شامل می‌شود که نقش اساسی در رشد و متابولیسم گیاه دارد. علائم تنش خشکی بسته به گونه، مرحله نموی، شرایط رشدی، و سایر فاکتورهای محیطی متفاوت می‌باشد (Ahluwalia *et al*., 2021). تنش خشکی از طریق اختلال در عملکرد روزنه و تغییر در معماری ریشه موجب ایجاد محدودیت در جریان آب و مواد مغذی به گیاه شده و به این طریق موجب کاهش رشد می‌شود (Parveen *et al*., 2019). حضور بیوچار در محیط موجب کاهش حلالیت و انتقال مواد مغذی محلول در آب شده و با فراهم آوردن تدریجی مواد غذایی مانع آبشویی مواد غذایی و افزایش حاصل‌خیزی خاک و رشد ریشه می‌شود. افزایش در رشد ریشه تحت تنش خشکی نشان‌دهنده تلاش گیاه برای جذب بیشتر آب و مواد غذایی است (Blum and Ebercon, 1981; Xu *et al*., 2013). افزایش وزن خشک گیاه آمارانتوس (*Amaranthus mangostanus* L.) (Jia *et al*., 2019) در اثر کاربرد بیوچار به‌دلیل افزایش دسترسی گیاه به آب و مواد غذایی و بهبود فیتوشیمی (Hryvusevich *et al*., 2022) خاک است. کاربرد خاکی سیلیس تحت تنش خشکی موجب کاهش اثرات تنش برگیاه و بهبود صفات رشدی گندم (*Triticum aestivum*) (Ebeed *et al*., 2023) و استحکام دیواره سلولی از طریق افزایش فرآیندهای لیگنینی‌شدن، سوبرینه‌شدن و سلیسی‌شدن گردید (Guerriero *et al*., 2016). نتایج مطالعه حاضر نشان داد که تنش خشکی در شرایط عدم استفاده از بیوچار و محلول‌پاشی، اثرات مخربی بر وزن خشک و صفات رشدی گیاه برجای گذاشت. در مقابل، کاربرد بیوچار همراه با محلول‌پاشی منجر به افزایش معنی‌دار وزن گیاه در شرایط کم‌آبیاری تا ۵۰ درصد ظرفیت زراعی گردید. این یافته‌ها حاکی از آن است که با توجه به محدودیت منابع آبی، کاهش میزان آبیاری تا ۵۰ درصد ظرفیت زراعی می‌تواند گامی مؤثر در جهت بهینه‌سازی مصرف آب و حفظ عملکرد گیاه باشد.

تنش خشکی موجب کاهش محتوای کلروفیل، فتوسنتز، رشد و ایجاد تغییر مرفولوژیکی از طریق ایجاد محدودیت در دسترسی به آب و مواد غذایی در گیاه می‌شود (Bhargava and Sawant, 2013). کاهش اندازه برگ، بیش از حد گرم شدن برگ، کاهش سطوح برداشت‌کننده نور، و پیری برگ از دلایل کاهش فتوسنتز تحت تنش خشکی است (Hassan *et al*., 2020; Ebeed and El-Helely, 2021). در شرایط بدون تنش آبی، به‌دلیل دسترسی مطلوب ریشه به آب و مواد غذایی تعادل بین فتوسنتز (منبع تولید) و منابع مصرف در سطح بالایی حفظ شده و به بهبود عملکرد گیاه منجر می‌شود. در شرایط تنش خشکی، جذب آب و مواد مغذی از ریشه کاهش می‌یابد که منجر به کاهش در عملکرد گلرنگ (*Carthamus tinctorius*) شد (Ghaedi *et al*., 2024). کاهش در محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی در ارقام حساس به تنش در ارتباط با ناپایداری

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: DOI: 10.22034/15.72.57]

کمپلکس کلروفیل- پروتئین و لیپیدهای آن‌ها، و همچنین تبدیل پیش‌ماده گلوتامات (لازم برای بیوسنتز کلروفیل و پرولین) به پرولین است که مانع تشکیل پلاستید و کلروفیل در گیاه می‌شود (Yadollahi *et al*., 2011). بهبود جذب عناصر غذایی (نیتروژن و منیزیم) و آب در اثر کاربرد بیوچار موجب افزایش بیوسنتز رنگیزه‌های فتوسنتزی و شاخص کلروفیل گیاه سلمکی (*Atriplex halimus*) (Bajji *et al*., 2002) و تنباکو (*Nicotiana tabacum* L.) (Tepecik *et al*., 2024) شد. تنش خشکی منجر به کاهش محتوای کلروفیل کل در گیاه شد. استفاده از بیوچار همراه با کود شیمیایی موجب افزایش در محتوای کلروفیل a در گلرنگ شد (Ghaedi *et al*., 2024). در مطالعه حاضر برخلاف بررسی Ghaedi و همکاران (۲۰۲٤) مشخص شد که استفاده از بیوچار همراه با تیمارهای بدون محلول‌پاشی و محلول‌پاشی نانوذره سیلیس موجب افزایش محتوای کلروفیل a در در تیمار آبیاری در ۱۰۰ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی شد که این اختلاف احتمالاً ناشی از تفاوت در گونه و غلظت بیوچار مصرفی باشد. استفاده از بیوچار برنج (۵۰-۲۵ تن در هکتار) موجب افزایش محتوای کلروفیل کاهو (*Lactuca sativa*) (Carter *et al*., 2013) و کاربرد سیلیس به ارتقای محتوای کلروفیل گندم (Ebeed *et al*., 2023) و ذرت (*Zea may*) (Parveen *et al*., 2019) تحت تنش خشکی کمک کرد. کاربرد سیلیس به بهبود فراساختار کلروپلاست و افزایش پایداری غشا کمک کرده و به این طریق به تداوم فتوسنتز و حفظ ساختار رنگیزه‌های فتوسنتزی در شرایط تنش‌های محیطی کمک می‌کند (Wang *et al*., 2019). نتایج نشان داد که تنش خشکی به‌طور قابل توجهی محتوای کلروفیل گیاه را در شرایط بدون استفاده از بیوچار و محلول‌پاشی کاهش داد. با این حال، به‌کارگیری همزمان بیوچار و محلول‌پاشی نانوذره موجب افزایش محتوای کلروفیل a در شرایط آبیاری تا ۵۰ درصد ظرفیت زراعی شد. در مورد کلروفیل b، پاسخ گیاه به تیمارها متنوع بود، به‌گونه‌ای که بیشترین مقدار این رنگدانه در شرایط آبیاری کامل همراه با کاربرد بیوچار و محلول‌پاشی مشاهده گردید. به‌طورکلی، استفاده ترکیبی از بیوچار و نانوذرات به عنوان راهکاری مؤثر در کاهش اثرات منفی تنش خشکی و بهبود وضعیت فتوسنتزی گیاه شناخته شد.

تنش خشکی موجب کاهش محتوای نسبی آب برخی از ارقام بادام شد. بیشترین محتوای نسبی آب برگ در رقم شکوفه روی پایه GF677 مشاهده شد. مطالعه انجام‌شده همچنین نشان داد که در ارقام مقاوم به خشکی، محتوای نسبی آب برگ، کلروفیل و پایداری غشا بیشتر از ارقام حساس به خشکی است (رنجبر و همکاران، ۱۳۹۷). استفاده از بیوچار (گندم و کتان) موجب افزایش محتوای نسبی آب برگ و عملکرد گلرنگ در شرایط کم‌آبیاری در مرحله گلدهی شد (Ghaedi *et al*., 2024). تنش خشکی موجب کاهش جذب آب توسط گیاه می‌شود. استفاده از سیلیس تحت تنش خشکی به بهبود وضعیت آب گیاه از طریق افزایش کارآیی مصرف آب و کاهش تعرق کوتیکولی کمک می‌کند (Matoh *et al*., 1991; Shi *et al*., 2016). در بررسی حاضر نیز تنش تأثیر منفی بر محتوای نسبی آب گیاه برگ داشت که همسو با نتایج مطالعات پیشین بود و نیز مشخص شد که استفاده از بیوچار تأثیر مثبت در افزایش محتوای نسبی آب برگ داشت که نشان‌دهنده کارآیی تیمار مورد استفاده در مطالعه حاضر بود.

پاسخ گیاه به تنش بسته به سن گیاه، شدت تنش، مدت تنش و گونه گیاهی متفاوت است. خارج‌شدن الکترولیت‌های ضروری از سلول در اثر تنش موجب ایجاد تغییرات در متابولیسم سلول و در صورت ادامه موجب مرگ سلول می‌شود. در تحقیقی در بادام مشخص شد که با افزایش دور آبیاری از ۳ تا ۱۵ روز بر نشت یونی ارقام مورد مطالعه افزوده شد و کمترین نشت یونی در بادام شکوفه پیوندشده روی پایه GF677 مشاهده شد (رنجبر و همکاران، ۱۳۹۷). تحت شرایط تنش، کاربرد بیوچار موجب کاهش انتقال یون به خارج از سلول در گیاه توتون شد (Kasheva *et al*., 2021). استفاده از سیلیس تحت تنش خشکی موجب افزایش پایداری غشا در گندم (Ebeed *et al*., 2023) به دلیل اتصال سیلیس به همی‌سلولزهای دیواره سلولی و افزایش پایداری غشای سلول (Ma *et al*., 2015) گردید. در این مطالعه، تنش خشکی منجر

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: DOI: 10.22034/15.72.57]

به افزایش معنی‌دار محتوای پراکسید هیدروژن و مالون دی‌آلدئید در بافت‌های گیاهی گردید، که نشانگر تشدید تنش اکسیداتیو است. با این حال، استفاده از محلول‌پاشی نانوذرات همراه با کاربرد بیوچار به‌طور قابل توجهی موجب کاهش غلظت این دو ترکیب اکسیداتیو شد. این نتایج حاکی از آن است که تیمارهای مورد استفاده در کاهش آسیب‌های اکسیداتیو و ارتقاء ظرفیت دفاعی گیاه نقش مؤثری داشته و به بهبود تحمل گیاه در مواجه با تنش خشکی کمک می‌کنند. بنابراین، به‌کارگیری این استراتژی‌ها می‌تواند به عنوان روشی مؤثر در مدیریت تنش‌های زیستی در گیاهان مورد توجه قرار گیرد.

افزایش تولید ترکیبات آنتی‌اکسیدانی آنزیمی و غیرآنزیمی بخشی از پاسخ دفاعی گیاه برای سمیت‌زدایی رادیکال‌های آزاد، حفظ تمامیت غشا، حفظ و پایداری فعالیت آنزیمی، و تنظیم فشار اسمزی در گیاه است که موجب افزایش تحمل گیاه در شرایط تنش می‌شود (Blum and Ebercon, 1981). نوع بیوچار مورد استفاده، نوع تنش و شدت آن بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی گیاه تأثیر دارد. در یک مطالعه مشخص شد که فعالیت آنزیم کاتالاز در شرایط عدم کاربرد بیوچار افزایش یافت (Jia *et al*., 2019). استفاده از بیوچار همراه با کود شیمیایی در شرایط تنش خشکی موجب کاهش فعالیت آنزیم کاتالاز در گلرنگ شد (Ghaedi *et al*., 2024). کاربرد خاکی سیلیس تحت تنش خشکی موجب افزایش محتوای پرولین و فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز گندم شد (Ebeed *et al*., 2023). استفاده از سیلیس موجب افزایش رشد ریشه و اندام هوایی گیاه، افزایش محتوای کلروفیل، قند محلول، پرولین و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی ذرت شد (Sun *et al*., 2021). سیلیس با بهبود وضعیت آبی گیاه، فعالیت فتوسنتزی، تنظیم اسمزی، بهبود سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی و فرآیندهای بیوشیمیایی، به بهبود فرآیندهای فیزیولوژیکی در گیاه کمک می‌کند (Saber *et al*., 2022; Malik *et al*., 2021). برخلاف نتایج مطالعات پیشین، در بررسی حاضر فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز و همچنین تجمع پرولین تحت شرایط آبیاری در ۳۰ درصد ظرفیت زراعی، با توجه به کاربرد یا عدم کاربرد بیوچار و محلول‌پاشی، افزایش یافت که نشان‌دهنده تلاش گیاه برای دفع رادیکال‌های آزاد اکسیژن است. نتایج بررسی حاضر در تأیید مطالعه انجام‌شده توسط Sun و همکاران (۲۰۲۱) است. شاید توجه به این مورد لازم است که تفاوت مشاهده‌شده در شدت پاسخ احتمالاً به نوع بیوچار و گونه گیاهی وابسته است. این یافته‌ها نشان‌دهنده پاسخ تطبیقی گیاه از طریق ارتقاء سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی آنزیمی و غیرآنزیمی به منظور مقابله با تنش خشکی است. بنابراین، فعال‌سازی این مکانیسم‌های دفاعی نقش کلیدی در بقای گیاه و کاهش آسیب‌های ناشی از کم‌آبی دارد.

تیمار با بیوچار تأثیر معنی‌داری بر محتوای نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم تنباکو داشت و مشخص شد که تیمار با بیوچار منجر به دسترسی بهتر به مواد غذایی و جذب آب توسط گیاه شد. استفاده از نیتروژن نقش مهمی در افزایش وزن تنباکو داشت و حضور مقادیر کافی کلسیم و منیزیم در برگ نقش مهمی در بهبود کیفیت برگ تنباکو داشت (Tepecik *et al*., 2024). بیوچار از طریق کاهش تبدیل کربن آلی در خاک موجب کاهش تقاضا برای نیتروژن و افزایش کارآیی نیتروژن جذب‌شده توسط گیاه می‌شود (Lehmann, 2007). دسترسی گیاه به فسفر و پتاسیم بستگی به نوع بیوچار دارد. بیوچار از طریق اتصال به کاتیون‌های آزاد (آهن سه ظرفیتی، کاتیون کلسیم و منیزیم) موجب رهاسازی مجدد فسفر در خاک می‌شود. بیوچار با افزایش فعالیت باکتری‌ها و قارچ‌های حل‌کننده پتاسیم موجب افزایش دسترسی گیاه به فسفر می‌شوند (Jia *et al*., 2019; Gao and DeLuca, 2020). تنش آبی موجب کاهش محتوای نیتروژن گلرنگ شد. استفاده از بیوچار همراه کود شیمیایی در شرایط تنش خشکی به افزایش دسترسی گیاه به نیتروژن، فسفر و پتاسیم کمک کرد (Ghaedi *et al*., 2024). حضور گروه‌های حاوی پیوندهای اکسیژن در سطح بیوچار به بهبود تهویه خاک کمک کرده و منجر به افزایش دسترسی گیاه به آب و مواد مغذی می‌شود (Semida *et*

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: DOI: 10.22034/15.72.57]

al., 2019).

سیلیس با تحت‌تأثیر قراردادن فعالیت‌های فتوسنتزی، جذب نیتروژن و افزایش تحمل در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی به بهبود رشد و عملکرد گیاه کمک می‌کند (Ahanger *et al.*, 2020). افزایش در محتوای کربن، نیتروژن و فسفر در اثر کاربرد سیلیس در نیشکر (*Saccharum officinarum*) مشاهده شد (Dutra *et al.*, 2023). پاسخ گیاه به سیلیس بسته به غلظت و روش استفاده متفاوت است (Dutra *et al.*, 2023). ادغام سیلیس در دیواره‌های سلولی می‌تواند به‌صورت فیتولیت (فرآیند کم‌نیاز به انرژی برای جایگزینی سیلیس به جای کربن در سلولز و همی‌سلولز) صورت گیرد (Singh *et al.*, 2023). سیلیس جذب‌شده با افزایش راندمان متابولیکی کربن و تولید اسکلت کربنی، ترکیب استوکیومتری عنصری را تغییر داده و موجب استفاده کارآمد نیتروژن و فسفر توسط گیاه و افزایش فتوسنتز می‌شود (Krouk and Kiba, 2020). در مطالعه حاضر، آبیاری در ۳۰ درصد ظرفیت زراعی در شرایط عدم کاربرد بیوچار و محلول‌پاشی موجب کاهش قابل توجه محتوای عناصر معدنی در بافت گیاه گردید. به‌کارگیری محلول‌پاشی نانوذرات سیلیس همراه با بیوچار تأثیر مثبتی در افزایش محتوای عناصر در سطوح مختلف تنش آبی را داشت. بیشترین میزان نیتروژن و کلسیم در شرایط آبیاری در حد ظرفیت زراعی به همراه کاربرد بیوچار و محلول‌پاشی مشاهده شد، درحالی‌که با افزایش شدت تنش به ۵۰ و ۳۰ درصد ظرفیت زراعی، تیمارهای مذکور تنها توانستند اثرات منفی تنش را تا حد محدودی کاهش دهند. این نتایج نشان‌دهنده نقش کلیدی بیوچار و نانوذرات سیلیس در بهبود جذب عناصر معدنی و افزایش مقاومت گیاهان در برابر تنش خشکی است.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از بررسی حاضر نشان داد که تنش آبی تأثیر منفی بر صفات رشدی و فیزیولوژیکی گیاه از طریق افزایش محتوای مالون دی‌آلدئید و پراکسید هیدروژن داشت. استفاده از تیمارهای بیوچار و محلول‌پاشی منجر به کاهش محتوای هر دو ترکیب و افزایش در فعالیت ترکیبات آنتی‌اکسیدانی آنزیمی و غیرآنزیمی شد که می‌تواند نقش مهمی در مدیریت باغ‌های بادام در مناطق کم‌آب داشته باشد. استفاده از بیوچار و تیمارهای محلول‌پاشی در شرایط آبیاری در ۱۰۰ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی منجر به افزایش وزن خشک، محتوای کلروفیل، فسفر و پتاسیم گیاه شد. افزایش در محتوای نیتروژن و کلسیم در شرایط آبیاری در ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی و کاربرد بیوچار و محلول‌پاشی مشاهده شد. به‌طورکلی، نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از بیوچار (۲۰ گرم در کیلوگرم خاک)، به‌عنوان راهکاری پایدار می‌تواند بخشی از اثرات خشکی را در باغ‌های بادام از طریق بهبود صفات رشدی، فیزیولوژیکی و تغذیه‌ای کاهش دهد درحالی‌که اثر محلول‌پاشی نانوذره سیلیس بیشتر به نقش مکمل محدود بود.

منابع

آمارنامه کشاورزی ایران (۱۴۰۲). وزارت جهاد کشاورزی، دفتر آمار و اطلاعات کشاورزی، تهران.

سردارلو، آیلار، وجودی مهربانی، لمیا، و عزیزپور، کامبیز (۱۴۰۴). تأثیر تنش شوری و محلول‌پاشی با نانوذرات اکسید روی، آهن و سلنیوم بر رشد و برخی صفات فیزیولوژیک *Gazania splendens* L. *فصلنامه علمی زیست‌شناسی کاربردی دانشگاه الزهرا*، ۳۸(۱)، ۴۶-۶۰.

رنجبر، عبدالباسط، ایمانی، علی، پیری پیرایواتلو، سعید، و عبدوسی، وحید (۱۳۹۷). تغییرات برخی خصوصیات فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی ارقام انتخابی بادام (*Prunus dulcis* Mill) پیوندشده بر روی پایه‌های مختلف تحت تنش خشکی. *فصلنامه*

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: DOI: 10.22034/15.72.57]

زیست‌شناسی تکوینی، ۱۰(۳)، ۳۲-۱۵.

وجودی مهربانی، لمیا، حسن‌پوراقدم، محمدباقر، و خوشمرام، لیلا (۱۴۰۳)، تأثیر کاربرد بیوچار و محلول‌پاشی با کوانتوم دات-ال سیستئین بر کنترل تنش شوری در گیاه کاسنی (*Cichorium intybus* L.). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گرایش گیاهان دارویی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان.

Ahanger, M. A., Bhat, J. A., Siddiqui, M. H., Rinklebe, J. ,& Ahmad, P. (2020). Integration of silicon and secondary metabolites in plants: A significant association in stress tolerance. *Journal of Experimental Botany*, *71*(21), 6758-6774.

Ahluwalia, O., Singh, P. C., & Bhatia, R. (2021). A review on drought stress in plants: Implications, mitigation and the role of plant growth promoting rhizobacteria. *Resources, Environment and Sustainability*, *5*, 100032 https://doi.org/10.1016/j.resenv.2021.100032

AOAC. (1990). Official Methods of Analysis. Association of Official Agricultural Chemists, Washington, DC.

Atkinson, C. J., Fitzgerald, J. D., & Hipps, N. A. (2010). Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: A review. *Plant and Soil*, *337*, 1-18.

Bajji, M., Kinet, J. M., & Lutts, S. (2002). Osmotic and ionic effects of NaCl on germination, early seedling growth, and ion content of *Atriplex halimus* (*Chenopodiaceae*). *Canadian Journal of Botany*, *80*(3), 297-304. 10.1139/b02-008

Bakhtiari, E. S., Mousavi, A., Yadegari, M., Haghighati, B., & Martinez-Garcia, P. J. (2025). Physiological and biochemical responses of almond (*Prunus dulcis*) cultivars to drought stress in semi-arid conditions in Iran. *Plants (Basel)*, *14*(5), 734. doi: 10.3390/plants14050734

Bhargava, S, & Sawant, K. (2013). Drought stress adaptation: Metabolic adjustment and regulation of gene expression. *Plant Breeding*, *132*(1), 21-32.

Blum, A, & Ebercon, A. (1981). Cell membrane stability as a measure of drought and heat tolerance in wheat 1. *Crop Science*, *21*(1), 43-47.

Borisev, M., Borisev, I., Zupunski, M., Arsenov, D., Pajevic, S., Curcic, Z., Vasin, J., & Djordjevic, A. (2016). Drought impact is alleviated in sugar beets (*Beta vulgaris* L.) by foliar application of fullerenol Nanoparticles. *PLoS ONE*, *11*(11), e0166248. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0166248

Carter, S., Shackley, S., Sohi, S., Suy, T. B., & Haefele, S. (2013). The impact of biochar application on soil properties and plant growth of pot grown lettuce (*Lactuca sativa*) and cabbage (*Brassica chinensis*). *Agronomy*, *3*, 404-418.

Chartzoulakis, K., Patakas, A., Kofidis, G., Bosabalidis, A., & Nastou, A. (2002). Water stress affects leaf anatomy, gas exchange, water relation and growth of two avocado cultivars. *Scientia Hortoculturae*, *95*, 39-50.

Chandrashekar, H. K., Singh, G., Kaniyassery, A., Thorat, S. A., Nayak, R., Murali, T. S., & Muthusamy, A. (2023). Nanoparticle-mediated amelioration of drought stress in plants: A systematic review. *3 Biotech*, *13*, 336 https://doi.org/10.1007/s13205-023-03751-4

Chiappero, J., del Rosario Cappellari, L., Alderete, L. G. S., Palermo, T. B., & Banchio, E. (2019). Plant growth-promoting rhizobacteria improve the antioxidant status in *Mentha piperita* grown under drought stress leading to an enhancement of plant growth and total phenolic content. *Industrial Crops and Products*, *139*, 111553. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111553

Dutra, A. F., Leite, M. R. L., Melo, C. C. D. F., Amaral, D. S., de Silva, J. L. F., Prado, R. M., Piccolo, M. C., Miranda, R. S., Junior, G, B. S., Sartos, T. K., Sossa, A., Mendes, W. M., Araujo, A. S. F., Zuffo, A. M., & Neto, F. A. (2023). Soil and foliar Si fertilization alters elemental stoichiometry and increases yield of sugarcane cultivars. *Scientific Reports*, *13*, 16040. https://doi.org/10.1038/s41598-023-43351-z

Ebeed, H. T, & El-Helely, A. A. (2021) Programmed cell death in plants: Insights into developmental and stress-induced cell death. *Current Protein and Peptide Science*, *22*(12), 873-889.

Ebeed, H. T., Hassan, N. M., & Ahmed, H. S. (2023). Silicon-mediated improvement of drought tolerance in two wheat genotypes. *Egyptian Journal of Botany*, *63*(2), 563-80.

Fedina, I., Georgieva, K., Velitchkova, M., & Grigorova, I. (2006). Effect of pretreatment of barley seedlings with different salts on the level of UV-B induced and UV-B absorbing compounds. *Environmental and Experimental Botany*, *56*, 225-230.

Gao, S, & DeLuca, T. H. (2020). Biochar alters nitrogen and phosphorus dynamics in a western rangeland ecosystem. *Soil Biology and Biochemistry*, *148*, 107868. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107868

Ghaedi, M., Bijanzadeh, E., Behpouri, A., & Najafi-Ghiri, M. (2024). Biochar application affected biochemical properties, yield and nutrient content of safflower under water stress. *Scientific Reports*, *14*, 20228. https://doi.org/10.1038/s41598-024-71131-w

Giannopolitis, C. N, & Ries, S. K. (1977). Superoxide dismutases: II. Purification and quantitative relationship with water-soluble protein in seedlings. *Plant Physiology*, *59*, 315-318.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: DOI: 10.22034/15.72.57]

Ghorbanpour, M., Mohammadi, H., & Kariman, K. (2020). Nanosilicon-based recovery of barley (*Hordeum vulgare*) plants subjected to drought stress. *Environmental Science: Nano*, *7*, 443-461. doi: 10.1039/C9EN00973F

Guerriero, G., Hausman, J. F., & Legay, S. (2016). Silicon and the plant extracellular matrix. *Frontiers in Plant Science*, *7*, 463. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00463

Hassan, N., Ebeed, H., & Aljaarany, A. (2020). Exogenous application of spermine and putrescine mitigate adversities of drought stress in wheat by protecting membranes and chloroplast ultra-structure. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, *26*(2), 233-245.

Heath, R. L, & Packer, L. (1968). Photo peroxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, *125*, 189-198.

Hryvusevich, P. V., Samokhina, V. V., & Demidch, V. V. (2022). Stress-induced electrolyte leakage from root cells of higher plants: Background, mechanism and physiological role. *Experimental Biology and Biotechnology*, *2*, 4-18. Doi: 10.33581/2957-5060-2022-2-4-18

Jia, W., Wang, C., Ma, C., Wang, J., Sun, M., & Xiang, B. (2019). Mineral elements uptake and physiological response of *Amaranthus mangostanus* (L.) as affected by biochar. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *175*, 58-65.

Kasheva, M., Bozukov, H., & Kochev, Y. (2021). Chemical and technological characteristics of large leaf tobacco Virginia 0842. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, *27*(1), 110-114.

Kaur, G, & Asthir, B. (2017), Molecular responses to drought stress in plants. *Biologia Plantarum*, *61*, 201-209.

Krouk, G, & Kiba, T. (2020). Nitrogen and phosphorus interactions in plants: From agronomic to physiological and molecular insights. *Current Opinion in Plant Biology*, *57*, 104-109. https://doi.org/10.1016/j.pbi.2020.07.002

Lehmann, J. (2007). A handful of carbon. *Nature*, *447*, 143-144.

Luhova, L., Lebeda, A., Hedererova, D., & Pec, P. (2003) Activities of amine oxidase, peroxidase and catalase in seedlings of *Pisum sativum* L. under different light conditions. *Plant Soil and Environment*, *49*, 151-157.

Lutts, S., Kinet, J. M., & Bouharmont, J. (1995). Changes in plant response to NaCl during development of rice (*Oryza sativa* L.) varieties differing in salinity resistance. *Journal of Experimental Botany*, *46*, 1843-1852.

Ma, J., Cai, H., He, C., Zhang, W., & Wang, L. (2015). A hemicellulose-bound form of silicon inhibits cadmium ion uptake in rice (*Oryza sativa*) cells. *New Phytologist*, *206*(3), 1063-1074.

Malik, M. A., Wani, A. H., Mir, S. H., Rehman, I. U., Tahir, I., Ahmad, P., & Rashid, I. (2021) Elucidating the role of silicon in drought stress tolerance in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, *165*, 187-195.

Matoh, T., Murata, S., & Takahashi, E. (1991). Effect of silicate application on photosynthesis of rice plants. *Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *62*, 248-251.

Nareshkumar, A., Veeranagamallaiah, G., Pandurangaiah, M., Kiranmai, K., Amaranathareddy, V., Lokesh, U., Venkatesh, B., & Sudhakar, C. (2015). Pb-stress induced oxidative stress caused alterations in antioxidant efficacy in two groundnut (*Arachis hypogaea* L.) cultivars. *Agricultural Science*, *6*, 1283-1297.

Parveen, A., Liu, W., Hussain, S., Asghar, J., Perveen, S., & Xiong, Y. (2019). Silicon priming regulates morphophysiological growth and oxidative metabolism in maize under drought stress. *Plants*, *8*(10), 431. doi: 10.3390/plants8100431

Saber, N. E., Abdel-Rahman, M. M., Mabrouk, M. E., Eldebawy, E. M., & Ismail, G. S. (2022). Silicon alleviates cadmium toxicity in *Triticum aestivum* L. plants by modulating antioxidants, nutrient uptake, and gene expression. *Egyptian Journal of Botany*, *62*(2), 319-336.

Semida, W. M., Beheiry, H. R., Setamou, M., Simpson, C. R., El-Mageed, T. A. A., Rady, M. M., & Nelson, S. D. (2019). Biochar implications for sustainable agriculture and environment: A review. *South African Journal of Botany*, *127*, 333-347.

Semida, W. M., Abdelkhalik, A., Mohamed, G. F., Abd El-Mageed, T. A., Abd El-Mageed, S. A., Rady, M. M., & Ali, E. F. (2021). Foliar application of zinc oxide nanoparticles promotes drought stress tolerance in eggplant (*Solanum melongena* L.). *Plants*, *10*(2), 421. https://doi.org/10.3390/plants10020421

Singh, P., Kumar, V., & Sharma, A. (2023). Interaction of silicon with cell wall components in plants: A review. *Journal of Multidisciplinary, Applied Natural Science*, *15*, 480-497. https://doi.org/10.31018/jans.v15i2.4352

Shi, Y., Zhang, Y., Han, W., Feng, R., Hu, Y., Guo, J., & Gong, H. (2016) Silicon enhances water stress tolerance by improving root hydraulic conductance in *Solanum lycopersicum* L. *Frontiers in Plant Science*, *7*, 196. doi.org/10.3389/fpls.2016.00196

Stewart, C. E., Zheng, J., Botte, J., & Cotrufo, M. F. (2012). Cogenerated fast pyrolysis biochar mitigates green-house gas emissions and increases carbon sequestration in temperate soils. *GCB Bioenergy*, *5*(2), 153-164. Doi:10.1111/gcbb.12001

Sun, Y., Xu, J., Miao, X., Lin, X., Liu, W., & Ren, H. (2021). Effects of exogenous silicon on maize seed germination and seedling growth. *Scientific Reports*, *11*(1), 1-13.

Tepecik, M., Ekren, S., Ongun, A. R., & Sarikahya, N. B. (2024). Effects of biochar treatments on the elemental composition of tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) leaves based on the priming period. *Heliyon*, *10*(1). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23307

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: DOI: 10.22034/15.72.57]

Urra, J., Alkorta, I., & Garbisu, C. (2019). Urra potential benefits and risks for soil health derived from the use of organic amendments in agriculture. *Agronomy*, *9*(9), 542. Doi:10.3390/agronomy9090542

Van Zwieten, L., Singh, B., Kimber, S., Murphy, D., Macdonald, L., Rust, J., & Morris, S. (2014). An incubation study investigating the mechanisms that impact N_2O flux from soil following biochar application. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, *191*, 53-62. Doi: 10.1016/j.agee.2014.02.030

Vojodi Mehrabani, L., Hassanpouraghdam, M. B., Rasouli, F., Okcu, Z., & Marc, R. A. (2023). Foliar application of graphene oxide, nano-Fe, and selenium mitigates salinity depression on *Ocimum basilicum*. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, *47*(4), 510-528.

Wang, Y., Zhang, B., Jiang, D., & Chen, G. (2019). Silicon improves photosynthetic performance by optimizing thylakoid membrane protein components in rice under drought stress. *Environmental and Experimental Botany*, *158*, 117-124.

Wang, Z., Yang, Y., Yadav, V., Zhao, W., He, Y., Zhang, X., & Wei, C. (2022). Drought-induced proline is mainly synthesized in leaves and transported to roots in watermelon under water deficit. *Horticultural Plant Journal*, *8*(5), 615-626.

Wei, J., Liu, L., Wei, Z., Qin, Q., Bai, Q., Zhao, C., Zhang, S., & Wang, H. (2025). Silicon nano-fertilizer-enhanced soybean resilience and yield under drought stress. *Plants (Basel)*, *14*(5), 751. doi: 10.3390/plants14050751

Xu, G., Wei, L. L., Sun, J. N., Shao, H. B., & Chang, S. X. (2013). What is more important for enhancing nutrient bioavailability with biochar application into a sandy soil: Direct or indirect mechanism? *Ecological Engineering*, *52*, 119-124. Doi: 10.1016/j.ecoleng.2012.12.091

Yang, Y., Mo, Y., Yang, X., Zhang, H., Wang, Y., Li, H., Wei, C., & Zhang, X. (2016). Transcriptome profiling of watermelon root in response to short-term osmotic stress. *PLoS ONE*, *11*, e0166314. doi: 10.1371/journal.pone.0166314

Yadollahi, A., Arzani, K., Ebadi, A., Wirthensohn, M., & Karimi, S. (2011). The response of different almond genotypes to moderate and severe water stress in order to screen for drought tolerance. *Scientia Horticulturae*, *129*, 403-413.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: DOI: 10.22034/15.72.57]

Growth response of ‘Shokoufeh’ almond (*Prunus amygdalus* var. Shokoufeh) seedlings to soil application of biochar and foliar spraying of silica nanoparticles under water deficit stress condition

Lamia Vojodi Mehrabani* and Zahra Masumpour

Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

Abstract

Drought is one of the most important environmental stresses that disrupts plant physiological and biochemical processes, thereby limiting growth and productivity. Identifying compounds that alleviate stress effects on plants is crucial. To assess the impact of water deficit stress [100, 50, and 30% field capacity (FC)], along with biochar application (0 and 20 g kg^{-1}) and foliar spraying of silica nanoparticles (0 and 3 mg L^{-1}), on the growth and some physiological traits of the almond cultivar Shokoufeh, a factorial experiment was conducted following a completely randomized design in the research greenhouse of Shahid Madani University of Azerbaijan. Irrigation at 100% and 50% FC, combined with biochar and silica nanoparticle foliar spraying, increased biomass, chlorophyll a, and phosphorus and potassium content in plants. The highest levels of nitrogen and calcium were observed with irrigation at FC combined with biochar application and silica nanoparticle spraying. The highest activities of catalase and superoxide dismutase enzymes, as well as proline content, were observed in the irrigation treatment at 30% FC combined with both levels of biochar and foliar spraying. Irrigation at 30% FC increased H_2O_2 and malondialdehyde contents in the plants. The results demonstrated that the combined application of biochar and foliar spraying of silica nanoparticles serves as an effective strategy to enhance growth and drought tolerance in the almond cultivar Shokoufeh under water deficit conditions. Optimal irrigation management in conjunction with these amendments can improve plant growth under drought stress by enhancing physiological traits and mitigating oxidative stress.

Keywords: Chlorophyll, Catalase, Elements, Relative Water Content, Total Soluble Solid Content

Received: Jul. 17, 2025; Revised: Sep. 30, 2025; Accepted: Dec. 08, 2025; Published Online: June. 02, 2026
*Corresponding Author: vojodilamia@gmail.com

Copyright © 2025 Iranian Society of Plant Physiology, Published by Isfahan University of Technology press. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: DOI: 10.22034/15.72.57]