https://ijpb.ui.ac.ir/?lang=en
Journal of Plant Biological Sciences
E-ISSN: 3041-9603
Vol. 17, Issue 2, No. 64, 2025
Document Type: Research Paper
Received: 06/09/2025 Accepted: 08/10/2025

The Effect of Nano-Silicon and Salicylic Acid on Antioxidant Activity and Photosynthetic Pigments in Pinto Bean Under Water Deficit

Ali Narimanzadeh[1], Parisa Sheikhzadeh[1], Mitra Rostami hir[2]*, Nasser Zare[1]

[1] Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
[2] Department of Agriculture, University of Applied Sciences and Technology, Tehran, Iran

Abstract

Given the problem of water scarcity, investigating the mechanisms of drought stress and finding ways to mitigate its adverse effects is significant. In this research, the impact of nano-silicon and salicylic acid on modulating the adverse effects of drought stress on the photosynthetic and biochemical indices of pinto beans was investigated. The experiment was conducted as a split-plot arrangement within a randomized complete block design with three replications. The investigated factors included irrigation at two levels as the main plot and foliar application of nano-silicon and salicylic acid as sub-plots. The results showed that foliar application of pinto bean plants with nano-silicon and salicylic acid significantly increased photosynthetic pigments, antioxidant enzyme activity, and seed yield, while reducing hydrogen peroxide and malondialdehyde levels. The highest activities of catalase, peroxidase, and polyphenol oxidase enzymes were 7.47, 40.33, and 10.26 units per milligram of protein, respectively, observed with the combined foliar application of 3 mM nano-silicon and 200 mg/L salicylic acid under drought stress conditions. This treatment combination also led to increases of 51.92% and 84.69% in chlorophyll a, 45.58% and 77.40% in chlorophyll b, 56.82% and 72.09% in total chlorophyll, and 34.95% and 40.64% in seed yield compared to the control treatment under full irrigation and drought stress conditions, respectively. Based on the results, the combined foliar application of nano-silicon and salicylic acid, particularly the integration of 3 mM nano-silicon and 200 mg/L salicylic acid, can be recommended to farmers as a helpful method for reducing losses due to water deficit stress and improving physiological indices related to drought tolerance.

Keywords: Antioxidant enzymes, Chlorophyll, Drought stress, Malondialdehyde, Nanoparticles

*Corresponding Author: m.rostami@uast.ac.ir

3041-9603 © University of Isfahan
This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

doi: 10.22108/ijpb.2025.146546.1420

Introduction

Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) is a vital legume rich in protein, playing a crucial role in global food security. However, its cultivation is severely threatened by drought stress, which is increasingly prevalent in semi-arid and even some humid regions due to global warming and climate change. Drought stress can cause a 10-100% reduction in yield, with seed weight specifically decreasing by up to 25%. This damage occurs through the impairment of pigments and plastids and the induction of oxidative stress. Under drought conditions, reactive oxygen species (ROS), such as superoxide ions, hydroxyl radicals, and hydrogen peroxide, accumulate, leading to lipid peroxidation and membrane damage that disrupt cellular functions. Consequently, current research focuses on understanding drought mechanisms and finding strategies to mitigate its negative impacts. One promising approach is the foliar application of protective agents such as silicon and salicylic acid (SA). Although not essential, silicon, often applied as nano-silicon to improve efficiency, benefits plants by improving water relations, protecting chloroplasts, and enhancing antioxidant synthesis. Salicylic acid is a key phytohormone that regulates protective processes, including stomatal closure, chlorophyll production, and the activation of antioxidant enzyme systems. Therefore, inducing drought tolerance without significantly compromising yield is a major agricultural challenge. This study investigates the potential of combined foliar application of nano-silicon and salicylic acid to enhance the drought tolerance of pinto beans by modulating photosynthetic and biochemical indices, thereby offering a practical strategy for farmers in water-limited environments.

Material and Methods

The research was conducted using a split-plot design based on a randomized complete blocks design with three replications at the research farm in the East Azerbaijan province, Sarab, during 2019-2020. The main factor was irrigation at two levels: full irrigation throughout the growing season and drought stress induced by withholding irrigation from the 50%flowering stage until physiological maturity. The sub-factor involved foliar spraying treatments at nine levels, including a control (water spray), two concentrations of nano-silicon (1 mM and 3 mM), two concentrations of salicylic acid (100 mg/L and 200 mg/L), and their combinations (1 mM nano-silicon + 100 mg/L salicylic acid, 1 mM nano-silicon + 200 mg/L salicylic acid, 3 mM nano-silicon + 100 mg/L salicylic acid, and 3 mM nano-silicon + 200 mg/L salicylic acid). The local pinto bean cultivar “Sarab” (Aqgin) with an indeterminate growth habit was used. Key physiological and biochemical traits measured included chlorophyll a and b, total carotenoids, antioxidant enzyme activities (such as superoxide dismutase and catalase), hydrogen peroxide content, malondialdehyde concentration as a marker of lipid peroxidation, and grain yield. After confirming the data's normality, all statistical analyses and comparisons of the resulting means were performed using SAS 9.1. The comparison of means was performed using Duncan's multiple-range test at the 5% significance level, and the figures were generated in Excel.

Result and Discussion

The results indicated that foliar application of pinto bean plants with nano-silicon and salicylic acid significantly increased photosynthetic pigments, antioxidant enzyme activity, and grain yield, while reducing hydrogen peroxide and malondialdehyde levels. The highest enzyme activities of catalase (7.47 U/mg protein), peroxidase (40.33 U/mg protein), and polyphenol oxidase (10.26 U/mg protein) were observed with the combined application of 3 mM nano-silicon and 200 mg/L salicylic acid under drought stress conditions. This treatment combination also increased chlorophyll a by 51.92% and 84.69%, chlorophyll b by 45.58% and 77.40%, total chlorophyll by 56.82% and 72.09%, and grain yield by 34.95% and 40.64% compared to the non-application treatment of nano-silicon and salicylic acid under full irrigation and drought stress conditions, respectively. Drought stress reduces chlorophyll by increasing reactive oxygen species (ROS), leading to membrane damage indicated by malondialdehyde (MDA) (Sharifa & Muriefah, 2015; Yekti et al., 2018). Plants respond by elevating antioxidant enzymes (CAT, POD, SOD) (Raziq et al., 2022; Farooq et al., 2021). Silicon mitigates damage by enhancing leaf strength and chlorophyll content (Liu et al., 2019) and boosting antioxidant defence to scavenge ROS (Shen et al., 2010; Teimoori et al., 2024). Similarly, salicylic acid (SA) directly increases antioxidant enzyme activity, protecting membranes and chlorophyll (Hayat et al., 2010; Miura & Tada, 2014). This study found a synergistic effect between silicon and SA. Their combined application was more effective than either alone in increasing antioxidant activity and reducing oxidative stress (H_2O_2, MDA) under drought, corroborating the findings of Maghsoudi et al. (2019). This enhanced physiological resilience ultimately improved seed yield, consistent with findings in other crops.

Conclusion

The results indicated that the combined application of 3 mM nano-silicon and 200 mg/L salicylic acid, especially under drought stress, had a positive and significant effect on antioxidant enzyme activity, increased photosynthetic pigment content, and reduced lipid peroxidation, thereby improving seed yield. Based on the results, the combined foliar application of nano-silicon and salicylic acid, particularly the integration of 3 mM nano-silicon and 200 mg/L salicylic acid, can be recommended to farmers as a useful method for reducing losses due to water deficit stress and improving physiological indices related to drought tolerance.

علوم زیستی گیاهی، سال هفدهم، شمارهٔ پیاپی شصت و چهارم، ۱۴۰۴، صفحهٔ ۱- ۲۴
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۱۵
تاریخ بررسی مجدد: ۱۴۰۴/۰۷/۱۴
تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۰۷/۱۶
مقاله پژوهشی

تأثیر نانوسیلیکون و اسیدسالیسیلیک بر فعالیت آنتی‌اکسیدانی و رنگیزه‌های فتوسنتزی لوبیا چیتی تحت تنش کم‌آبی

علی نریمان‌زاده[۱]، پریسا شیخ‌زاده[۱]، میترا رستمی هیر*[۲]، ناصر زارع[۱]
[۱] گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
[۲] گروه کشاورزی، دانشگاه جامع علمی- کاربردی، تهران، ایران

چکیده

با توجه به مشکل کم‌آبی، بررسی سازوکارهای تنش خشکی و یافتن روش‌هایی برای به حداقل رساندن اثرات منفی آن، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پژوهش، اثرات نانو سیلیکون و اسیدسالیسیلیک در تعدیل اثرات نامطلوب تنش کم‌آبی بر شاخص‌های فتوسنتزی و بیوشیمیایی لوبیا چیتی مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش به‌صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار انجام شد. عامل‌های مورد بررسی شامل آبیاری در دو سطح به‌عنوان کرت اصلی و محلول‌پاشی نانوسیلیکون و اسیدسالیسیلیک در کرت‌های فرعی قرار گرفتند. نتایج نشان داد محلول‌پاشی بوته‌های لوبیا چیتی با نانوسیلیکون و اسیدسالیسیلیک موجب افزایش معنی‌دار رنگیزه‌های فتوسنتزی، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و عملکرد دانه شد و میزان پراکسیدهیدروژن و مالون‌دی‌آلدهید را کاهش داد. بیش‌ترین فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز و پلی‌فنول اکسیداز به‌ترتیب ۷/۴۷، ۴۰/۳۳ و ۱۰/۲۶ واحد بر میلی‌گرم پروتئین، با محلول‌پاشی توأم ۳ میلی‌مولار نانو سیلیکون و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر اسیدسالیسیلیک تحت تنش کم‌آبی مشاهده شد. این ترکیب تیماری همچنین موجب افزایش ۵۱/۹۲ و ۸۴/۶۹ درصدی کلروفیل a، ۴۵/۵۸ و ۷۷/۴۰ درصدی کلروفیل b، ۵۶/۸۲ و ۷۲/۰۹ درصدی کلروفیل کل و ۳۴/۹۵ و ۴۰/۶۴ درصدی عملکرد دانه نسبت به تیمار شاهد به‌ترتیب تحت شرایط آبیاری کامل و تنش کم‌آبی شد. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان محلول‌پاشی نانوسیلیکون و اسیدسالیسیلیک به‌صورت ترکیبی به‌ویژه تلفیق غلظت‌های ۳ میلی‌مولار نانوسیلیکون و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر اسیدسالیسیلیک را به عنوان یک روش مفید برای کاهش خسارات ناشی از تنش کم‌آبی و بهبود شاخص‌های فیزیولوژیک مرتبط با تحمل به خشکی به کشاورزان توصیه نمود.

واژه‌های کلیدی: آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، تنش خشکی، کلروفیل، مالون‌دی‌آلدهید، نانو ذرات

*Corresponding Author: m.rostami@uast.ac.ir

3041-9603 © University of Isfahan
This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).
doi: 10.22108/ijpb.2025.146546.1420

مقدمه

لوبیا با نام علمی *Phaseolus vulgaris* L. یکی از حبوبات مهم و غنی از پروتئین است که در امنیت غذایی جامعه جهانی نقش مهمی دارد (Subramani et al., 2024). هنگامی که این گیاه در معرض تنش خشکی انتهای فصل و یا تنش‌های متناوب قرار گیرد، عملکرد آن ۱۰ تا ۱۰۰ درصد کاهش می‌یابد و به‌طور خاص، وزن دانه ۲۵ درصد کاهش می‌یابد (Smith et al., 2019). تنش خشکی در مناطق نیمه‌خشک جهان و حتی برخی مناطق مرطوب به علّت گرمایش سریع جهانی و تغییرات آب و هوایی، در حال افزایش بوده و سبب خسارت به گیاهان زراعی و کاهش تولید آن‌ها می‌شود (Sari et al., 2024). کمبود آب سبب آسیب به رنگدانه‌ها و پلاستیدها می‌شود (Kang et al., 2023) و اثر تنش اکسیداتیو را تقویت می‌کند به طوری که در شرایط تنش عوامل ایجاد تنش اکسیداتیو مانند یون سوپراکسید، رادیکال هیدروکسیل و پراکسید هیدروژن افزایش می‌یابد (Hussain et al., 2019). گونه‌های فعال اکسیژن تولید شده در اثر تنش خشکی، با پراکسیداسیون چربی‌ها و پروتئین‌ها سبب خسارت به غشای سلولی و اختلال در عملکرد سلول‌ها می‌شوند (Ullah et al., 2018). در حال حاضر، اکثر پژوهش‌ها در زمینه تنش خشکی، با هدف درک سازوکارهای آن و یافتن راهکارهایی برای به حداقل رساندن اثرات منفی آن، صورت می‌گیرد (Vicente-Serrano et al., 2022). یکی از روش‌های افزایش مقاومت گیاه در برابر تنش خشکی، محلول‌پاشی با عناصری مانند سیلیکون (Teimoori et al., 2024) و تنظیم‌کننده‌های رشد مانند اسید سالیسیلیک (Sharma et al., 2017) است.

سیلیکون دومین عنصر فراوان در پوسته زمین است، این عنصر اگرچه ماده غذایی غیرضروری برای گیاهان محسوب می‌شود، ولی اثرات مفیدی بر رشد و بهره‌وری انواع گونه‌های گیاهی تحت شرایط مختلف محیطی دارد (Sharma, 2023). این عنصر عمدتاً به شکل اسید سیلیسیک ($Si(OH)_4$) توسط ریشه‌های گیاه جذب می‌شود (Ma & Yamaji, 2006). همچنین می‌تواند به طور مؤثری توسط محلول‌پاشی برگ‌ها و جذب از مسیرهای کوتیکولی، روزنه‌ها و تریکوم‌ها وارد گیاه شود (Puppe & Sommer, 2018). میزان تجمع سیلیکون در بین گونه‌های گیاهی بسیار متفاوت بوده و از یک‌دهم تا ۱۰ درصد وزن خشک گیاه، متغیر است (Luyckx et al., 2017). سیلیکون توسط محافظت فیزیکی- مکانیکی و ایجاد پاسخ‌های بیوشیمیایی به گیاهان در مقابله با تنش‌های محیطی کمک می‌کند (Luyckx et al., 2017). سیلیکون بر بهبود روابط آبی گیاه توسط افزایش ضخامت برگ با ایجاد یک لایه سیلیسی در زیر اپیدرم (کاهش تلفات آب توسط تعرق کوتیکولی) و افزایش جذب آب از خاک (ناشی از افزایش طول ریشه) موثر است (Gong et al., 2003; Hattori et al., 2005). حفظ فتوسنتز خالص با تکیه بر تثبیت ساختارهای کلروپلاست و افزایش غلظت رنگدانه (Tripathi et al., 2015) و سنتز آنتی‌اکسیدان‌هایی نظیر آسکوربات پراکسیداز، گلوتاتیون ردوکتاز و دهیدروآسکوربات ردوکتاز از جمله تغییرات متابولیکی ایجاد شده در اثر کاربرد سیلیکون در گیاهان تحت تنش خشکی است (Singh et al., 2019).

اسیدسالیسیلیک یک تنظیم‌کننده رشد گیاهی است که در سطوح پائین خود، نقش مهمی در سیستم حفاظتی گیاه در برابر تنش‌های زیستی و غیرزنده ایفا می‌کند (Idrees et al., 2013). اسیدسالیسیلیک همچنین در کنترل فرآیندهایی شامل بسته شدن روزنه، تولید کلروفیل و پروتئین، جذب مواد مغذی، تعرق و فتوسنتز نقش دارد (Abbas et al., 2019). علاوه بر این، اسیدسالیسیلیک بر تجمع ایزوپرنوئیدها (توکوفرول، کاروتنوئیدها و مونوترپن‌ها) در بافت‌های برگ، به‌ویژه در شرایط تنش خشکی تأثیر می‌گذارد و همچنین زوال گونه‌های اکسیژن فعال و عملکرد آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی را تنظیم می‌کند (Arndt et al., 2001).

با توجه به تأثیر منفی تنش خشکی بر عملکرد گیاهان زراعی، پژوهش‌های متعددی درباره نحوه سازگاری و تطابق گیاهان در سطوح مختلف، از ریخت شناسی و ساختارهای تشریحی گرفته تا واکنش‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی صورت گرفته است (Kapoor et al., 2020). در حال حاضر افزایش تحمل به خشکی بدون تأثیر قابل توجه بر عملکرد دانه، یکی از چالش‌های بزرگ در کشاورزی است، در این راستا، القای تحمل به خشکی در گیاهان توسط محلول‌پاشی تنظیم‌کننده‌های رشد (Sharma et al., 2017) و عناصر ریزمغذی (Repke et al., 2022)، به عنوان یک راهبرد در گیاهان مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. Vaisnad & Talebi (2015) بیان کردند که اسیدسالیسیلیک با افزایش محتوای کلروفیل و کاروتنوئید سبب افزایش عملکرد دانه در نخود (*Cicer arietinum*) شد. افزایش فعالیت سیستم آنتی‌اکسیدانی، پایداری غشاء و افزایش رنگدانه‌های فتوسنتزی در اثر کاربرد اسیدسالیسیلیک در گندم (*Triticum aestivum* L.) و جو (*Hordeum vulgare*) نیز گزارش شده است (Chen et al., 2015; Habibi et al., 2012). Chavoushi et al. (2019) در بررسی خود گزارش کردند که کاربرد اسیدسالیسیلیک با کاهش تولید رادیکال‌های آزاد موجب کاهش محتوای مالون‌دی‌آلدهید در گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.) شد. محلول‌پاشی بوته‌های ذرت (*Zea mays*) در مرحله چهار برگی با اسیدسالیسیلیک ضمن افزایش محتوی نسبی آب، کلروفیل کل، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، وزن تر بوته و سطح برگ هم در شرایط تنش و هم در عدم تنش خشکی سبب کاهش ۲۰ درصدی نشت یونی شد (Naghizadeh & Kabiri, 2017). Askarnejad et al. (2019) نیز گزارش کردند که کاربرد سیلیکون در شرایط تنش خشکی توسط بهبود محتوای کلروفیل و قندهای محلول موجب افزایش ارتفاع گیاه و وزن خشک و تر اندام هوایی و ریشه گیاه استویا (*Stevia rebaudiana Bertoni*) شد. Abbasi et al. (2018) اظهار داشتند کاربرد نانوسیلیکون در شرایط تنش خشکی با بهبود محتوای کلروفیل a، b و کاروتنوئید، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و محتوای پرولین و کاهش میزان مالون‌دی‌آلدهید، موجب افزایش سطح برگ، وزن خشک و وزن هزار دانه گندم شد. Sajed gollojeh, et al (2021) نیز گزارش کردند محلول‌پاشی نانوسیلیکون و اسیدسالیسیلیک تحت شرایط محدودیت آبی با بهبود شاخص سبزینگی موجب افزایش ارتفاع بوته، تعداد شاخه در بوته، تعداد دانه، وزن هزار دانه و عملکرد دانه کلزا (*Brassica napus*) شد. همچنین گزارش شده است کاربرد سیلیکون بر روی گیاه کلزا تحت تنش خشکی، با کاهش تنش اکسیداتیو منجر به کاهش محتوای پراکسید هیدروژن و محتوای مالون‌دی‌آلدهید می‌شود (Hasanuzzaman et al., 2018). Maghsoudi et al. (2016) نیز گزارش کردند به‌علّت کاربرد سیلیکون در ارقام گندم، میزان خسارت وارده شده تحت تأثیر تنش خشکی در اثر افزایش محتوای نسبی آب، افزایش پایداری غشای سلولی و افزایش سرعت فتوسنتز، کاهش یافت.

پژوهش‌ها نشان داده‌اند که اثر کاربرد همزمان دو یا چند محرک رشد بیشتر از اثر هر یک از آن‌ها به صورت جداگانه است. بررسی تأثیر اکسین و جیبرلین بررشد رویشی و زایشی خیار (*Cucumis sativus* L.) نشان داد اعمال هم زمان اکسین با غلظت ۱۰۰میلی‌گرم بر لیتر و جیبرلیک اسید با غلظت ۲۵ میلی‌گرم بر لیتر تأثیر مثبتی در افزایش عملکرد گیاه و تبدیل گل‌های ماده به میوه داشتند (Jonoubi & Arang, 2024). بررسی ویژگی‌های فیزیولوژیکی و مواد مؤثره استبرق (*Calotropis procera*) تحت تیمار نانوذرات اکسید آهن و سالیسیلیک اسید نشان دادند نانو ذرات اکسید آهن همراه با سالیسیلیک اسید توانایی بیشتری نسبت به سایر تیمارها در رشد، بهبود فاکتورهای فیزیولوژیکی و تولید اسانس‌ها در گیاهچه‌های استبرق داشتند (Adabavazeh et al., 2023). بررسی کاربرد اسید سالیسیلیک و سیلیکون بر شاخص‌های فیزیولوژیکی و ریخت‌شناسی در گیاه گل

سازویی (*Scrophularia striata* L.) در شرایط تنش خشکی نشان دادند کاربرد همزمان اسید سالیسیلیک (۱۰۰ppm) و سیلیکون (۱ گرم بر لیتر) موجب افزایش فتوسنتز و فاکتورهای تبادل گازی شده و صدمات ناشی از تنش خشکی را کاهش داد (Shohani et al., 2022).

خشکی یکی از مهمترین عوامل تأثیرگذار بر عملکرد بهینه گیاهان زراعی در مناطق خشک و نیمه خشک است که با ایجاد محدودیت در جذب آب، سبب کاهش فتوسنتز و عملکرد می‌شود. در این راستا به علّت اهمیت حبوبات به ویژه لوبیا چیتی در تأمین بخشی از پروتئین رژیم غذایی مردم و نقش نانوسیلیکون و اسیدسالیسیلیک در تعدیل یا کاهش اثرات نامطلوب تنش خشکی موجب شد تا اثر این عوامل بر برخی از صفات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی موثر در عملکرد این گیاه تحت تنش خشکی مورد بررسی قرار گیرد.

موارد وروش‌ها

پژوهش حاضر، جهت بررسی تأثیر کاربرد نانوسیلیکون و اسیدسالیسیلیک بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی لوبیا چیتی تحت تنش کم‌آبی انتهای فصل، در بهار سال ۱۳۹۹ در مزرعه‌ای در روستای رازلیق واقع در شهرستان سراب، (با مختصات جغرافیایی ۴۷ درجه و ۵۰ دقیقه طول جغرافیایی، ۳۸ درجه و ۴۲ دقیقه شرقی عرض جغرافیایی و با ارتفاع ۱۷۹۰ متری از سطح دریا) اجرا شد. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی در جدول (۱) و ویژگی‌های هواشناسی منطقه در طول اجرای آزمایش در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه در عمق ۳۰ سانتی‌متری

Table 1- Physical and chemical characteristics of the farm soil at the depth of 0-30 cm

Soil Texture	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	K (ppm)	P (ppm)	Organic carbon (%)	pH	EC ($ds\ m^{-1}$)
لومی loam	36	42	22	202.5	11.83	2.67	7.8	0.85

جدول ۲- مشخصات جوی در طول دوره رشدی لوبیا چیتی در سال زراعی ۱۳۹۹

Table 2- Atmospheric characteristics during the growth period of beans in the crop year 2019

Moon	Climatic parameters					
	Average temperature (C°)	Minimum temperature (C°)	Maximum temperature (C°)	Total hours of sunshine (h)	relative humidity (%)	Total rainfall (mm)
April	9.85	1.78	13.62	191	67.79	72.45
May	19.6	6.54	22.32	303.1	55.25	25.86
June	22.94	8.92	27.21	342.3	47.83	10.56
July	24.18	12.60	28.71	324.4	51.81	17.31
August	20.96	9.81	26.32	370.9	57.04	1.82
September	20.51	8.00	26.76	310.5	54.15	7.93

آزمایش به‌صورت کرت‌های خُرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار، بر روی لوبیا چیتی (رقم محلی سراب معروف به آق‌گین، با تیپ رشدی ایستاده و رشد نامحدود) که از بازار محلی تهیه شده بود، انجام شد. عامل‌های مورد بررسی شامل آبیاری در دو سطح (آبیاری کامل و قطع آبیاری از مرحله ۵۰ درصد گلدهی تا انتهای فصل رشدی) به‌عنوان کرت اصلی و محلول‌پاشی نانوسیلیکون و اسیدسالیسیلیک در ۹ سطح شامل عدم

مصرف نانوسیلیکون و اسیدسالیسیلیک به عنوان تیمار شاهد (آبیاری کامل و محلول‌پاشی با آب)، ۱ میلی‌مولار نانوسیلیکون، ۳ میلی‌مولار نانوسیلیکون، ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر اسیدسالیسیلیک، ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر اسیدسالیسیلیک، ۱ میلی‌مولار نانوسیلیکون + ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر اسیدسالیسیلیک، ۱ میلی‌مولار نانوسیلیکون + ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر اسیدسالیسیلیک، ۳ میلی‌مولار نانوسیلیکون + ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر اسیدسالیسیلیک و ۳ میلی‌مولار نانوسیلیکون + ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر اسیدسالیسیلیک که در کرت‌های فرعی قرار گرفتند. نانوسیلیکون (سایز ذرات: ۲۰- ۳۰ نانومتر، خلوص: ۹۸ درصد، رنگ نانوذره: سفید و مساحت سطح ویژه نانو ذرات: ۱۸۰-۶۰۰ متر مربع بر گرم) مورد استفاده در این پژوهش از شرکت پیشگامان نانو مواد ایرانیان تهیه شده بود.

زمین محل اجرای آزمایش پس از انجام شخم بهاره با انجام عملیات تکمیلی تهیه زمین شامل دیسک‌زنی و ایجاد جوی و پشته آماده کاشت شد. جوی و پشته‌ها به کمک جوی و پشته ساز دستی، به عرض ۳۰ سانتی‌متر ایجاد شدند. پس از انجام عملیات آماده‌سازی زمین و قبل از کاشت بذور، بر اساس آزمون خاک به میزان ۶۹ کیلوگرم در هکتار کود فسفره از منبع فسفات آمونیوم و ۲۳ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص از منبع اوره جهت تأمین عناصر غذایی مورد نیاز گیاه به زمین به‌صورت یکنواخت اضافه شد. کاشت بذور لوبیا چیتی در تاریخ ۲۳ اردیبهشت ماه ۱۳۹۹ در واحدهای آزمایشی شامل ۶ خط کاشت به طول ۴ متر با فاصله ۲۵ سانتی‌متر بین ردیف و ۱۴ سانتی‌متر روی ردیف در عمق ۸ سانتی‌متری خاک در راس پشته‌ها با تراکم ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار به‌صورت دستی صورت گرفت. جهت جلوگیری از انتقال مواد بین واحدهای آزمایشی، بین هر واحد به اندازه دو پشته فاصله ایجاد شد. در این پژوهش، آبیاری به روش نشتی (جوی و پشته) صورت گرفت. کرت‌های دارای آبیاری کامل تا انتهای دوره رشدی در هشت نوبت و کرت‌های با تیمار تنش کم‌آبی تا مرحله ۵۰ درصد گلدهی در شش نوبت آبیاری شدند. اولین آبیاری بلافاصله پس از کاشت و آبیاری‌های بعدی نیز براساس نیاز گیاه و شرایط آب و هوایی منطقه تا مرحله ۵۰ درصد گلدهی در تاریخ‌های ۱۳۹۹/۰۲/۳۰، ۱۳۹۹/۰۳/۱۴، ۱۳۹۹/۰۳/۲۶، ۱۳۹۹/۰۴/۰۸ و ۱۳۹۹/۰۴/۲۰ انجام شد. جهت اعمال تیمار تنش کم‌آبی انتهای فصل، قطع آبیاری در مرحله ۵۰ درصد گلدهی در کرت‌های مورد نظر از ۱۳۹۹/۰۴/۲۰ انجام شد، امّا در کرت‌های با تیمار آبیاری کامل تا زمان رسیدگی، با دو نوبت آبیاری بیشتر ادامه بافت. محلول‌پاشی با نانوسیلیکون و اسیدسالیسیلیک در سه مرحله (مرحله رویشی (۶ تا ۸ برگی)، مرحله ۵۰ درصد گلدهی و مرحله ۵۰ درصد غلاف‌بندی) توسط سم‌پاش پشتی ۱۲ لیتری (با نازل تلسکوپی استیل و پاشش به‌صورت مه‌پاش) به‌صورت دستی تا حدی انجام شد که تمامی سطوح برگ‌ها پوشش داده شوند. جهت افزایش میزان جذب نانوسیلیکون و اسیدسالیسیلیک محلول‌پاشی در هر مرحله، به هنگام صبح و وجود کمترین میزان وزش باد انجام شد به طوری که تمام قسمت‌های هوایی بوته‌های موجود به‌طور کامل مرطوب شوند. از ابتدای دوره آزمایش، عملیات وجین برای کنترل علف‌های هرز در چندین نوبت و به‌صورت دستی انجام شد. یک هفته بعد از انجام محلول‌پاشی در مرحله غلاف‌بندی (نوبت سوم)، نمونه‌برداری از آخرین برگ توسعه‌یافته برای اندازه‌گیری میزان کلروفیل، کاروتنوئید، پراکسید هیدروژن و فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز و پلی‌فنل اکسیداز، انجام شد. نمونه‌ها در فریزر (مدل دیپ فریز ۸۰- درجه سانتیگراد JD، شرکت ژال طب) و تحت دمای ۸۰- درجه سانتی‌گراد تا زمان اندازه‌گیری صفات، نگهداری شدند.

آزمایش‌های مربوط به صفات مورد ارزیابی در آزمایشگاه‌های دانشکده کشاورزی دانشگاه محقق اردبیلی انجام گرفت. برای اندازه‌گیری رنگیزه‌های فتوسنتزی شامل کلروفیل a ، b، کلروفیل کل و کاروتنوئیدها، از برگ‌های

تازه گیاه در مرحله غلاف‌بندی استفاده شد. بدین منظور ۰/۱ گرم از بافت تر گیاهی با ۱۰ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد سائیده و پس از سانتریفوژ (مدل Eppendorf, Germany) در ۶۰۰۰ دور به مدت ۱۰ دقیقه، جذب نوری محلول رویی در طول‌موج‌های ۶۶۳، ۶۴۵ و ۴۷۰ نانومتر خوانده شد. مقادیر رنگیزه‌ها بر اساس روش Lichtenthaler (1987) محاسبه و بر حسب میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ بیان شد. برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم کاتالاز، ابتدا محلول واکنش شامل بافر فسفات ۱۰۰ میلی‌مولار با pH= ۷ و آب اکسیژنه ۳۰ درصد تهیه شد. سپس ۵۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی به محلول اضافه و تغییرات جذب در طول موج ۲۴۰ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر (Biorad, Smart Spec, USA) به مدت یک دقیقه (در فواصل ۱۵ ثانیه‌ای) ثبت شدند. به عنوان شاهد، نمونه‌ای حاوی بافر فسفات ۰/۱ میلی‌مولار به جای عصاره آنزیمی استفاده شد. فعالیت آنزیم بر اساس میزان تغییرات جذب بر میکروگرم پروتئین بر دقیقه محاسبه شد(Chen & Zhang, 2016). همچنین فعالیت آنزیم پراکسیداز نیز بر اساس روش Chen et al. (2016) اندازه‌گیری شد. محلول واکنش حاوی ۹۵۰ میکرولیتر از مخلوط بافر فسفات ۱۰۰ میلی‌مولار (pH=۷)، آب اکسیژنه ۳۰ درصد و گایاکول ۰/۲ درصد بود. به این محلول، ۵۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی اضافه و تغییرات جذب در ۴۷۰ نانومتر به مدت ۱ دقیقه ثبت شد. نمونه شاهد نیز با بافر فسفات ۰/۱ مولار تهیه شد. فعالیت آنزیم بر اساس مقدار پراکسید هیدروژن تجزیه شده بر دقیقه به ازای هر میلی‌گرم پروتئین محاسبه شد.

فعالیت آنزیم پلی‌فنول‌اکسیداز بر اساس روش Karo & Mishra (1976) اندازه‌گیری شد، محلول واکنش شامل ۱/۵ میلی‌لیتر بافر تریس ۰/۲ مولار با اسیدیته ۷/۶ و ۴۰۰ میکرولیتر پیروگالول (۰/۰۲ مولار) بود که با افزودن ۱۰۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی تکمیل شد و به مدت ۵ دقیقه در حمام بن‌ماری با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. در نهایت جذب نوری در طول موج ۴۲۰ نانومتر اندازه‌گیری شد و نمونه شاهد نیز با بافر فسفات ۰/۱ میلی‌مولار تهیه شد. فعالیت آنزیم بر اساس تغییرات جذب بر میکروگرم پروتئین بر دقیقه محاسبه شد. برای اندازه‌گیری میزان پراکسید هیدروژن، یک گرم نمونه برگ پودر شده با نیتروژن مایع به فالکون ۱۰ میلی‌لیتری انتقال و به آن ۱/۵ میلی‌لیتر محلول تری‌کلرواستیک اسید یک درصد اضافه و با سرعت ۱۲۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۵ دقیقه و در دمای چهار درجه سانتی‌گراد سانتریفیوژ شد. سپس به ۰/۵ میلی‌لیتر از محلول رویی حاصل، ۰/۵ میلی‌لیتر محلول بافر فسفات پتاسیم ۰/۱ مولار (pH=۷) و یک میلی‌لیتر محلول یک مولار یدید پتاسیم اضافه و میزان جذب در طول موج ۳۹۰ نانومتر اندازه‌گیری شد (Alexieva et al., 2001).

برای اندازه‌گیری میزان مالون‌دی‌آلدهید، ۰/۵ گرم از نمونه برگ در ۱۰ میلی‌لیتر محلول ۰/۱ درصد تری کلرواستیک اسید، همگن و به مدت ۱۰ دقیقه در ۱۵۰۰۰ دور بر دقیقه سانتریفیوژ شد. دو میلی‌لیتر از محلول رویی با ۴ میلی‌لیتر از محلول ۲۰ درصد تری کلرواستیک اسید محتوی ۰/۵ درصد تیوباربیتوریک اسید مخلوط به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری و پس از سرد کردن، نمونه‌ها به مدت ۱۰ دقیقه در ۱۰۰۰۰ دور بر دقیقه سانتریفوژ و جذب در طول موج ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر ثبت شدند (Stewart & Bewley, 1980).

در زمان رسیدگی کامل (۱۳۹۹/۰۶/۲۳)، جهت تعیین عملکرد دانه بعد از حذف ردیف‌های انتهایی و نیم‌متر از ابتدا و انتهای هر کرت به‌عنوان حاشیه، بوته‌های موجود در مساحتی به ابعاد یک مترمربع از هر کرت آزمایشی برداشت و عملکرد دانه بر حسب کیلوگرم در هکتار محاسبه شد. پس از تأیید نرمال بودن داده‌ها، کلیه تجزیه‌های آماری و مقایسه میانگین‌های داده‌های حاصل توسط نرم‌افزار SAS 9.1 انجام شد. برای مقایسه میانگین داده‌ها از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد استفاده شد و ترسیم

شکل‌ها با بهره‌گیری از نرم‌افزار Excel انجام پذیرفت.

نتایج

میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی

براساس نتایج جدول تجزیه واریانس، تأثیر برهم‌کنش سه‌جانبه آبیاری × نانوسیلیکون × اسیدسالیسیلیک بر محتوای کلروفیل a و کلروفیل کل برگ معنی‌دار بود (جدول۳). در رابطه با محتوای کلروفیل b برگ نیز نتایج نشان دادند تأثیر نانوسیلیکون و اسیدسالیسیلیک و اثرات سه‌جانبه آبیاری × نانوسیلیکون × اسیدسالیسیلیک بر محتوای کلروفیل b برگ معنی‌دار بود (جدول۳).

جدول ۳- تجزیه واریانس تاثیر تیمارهای آبیاری، نانوسیلیکون و اسیدسالیسیلیک بر محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی برگ‌های لوبیا چیتی

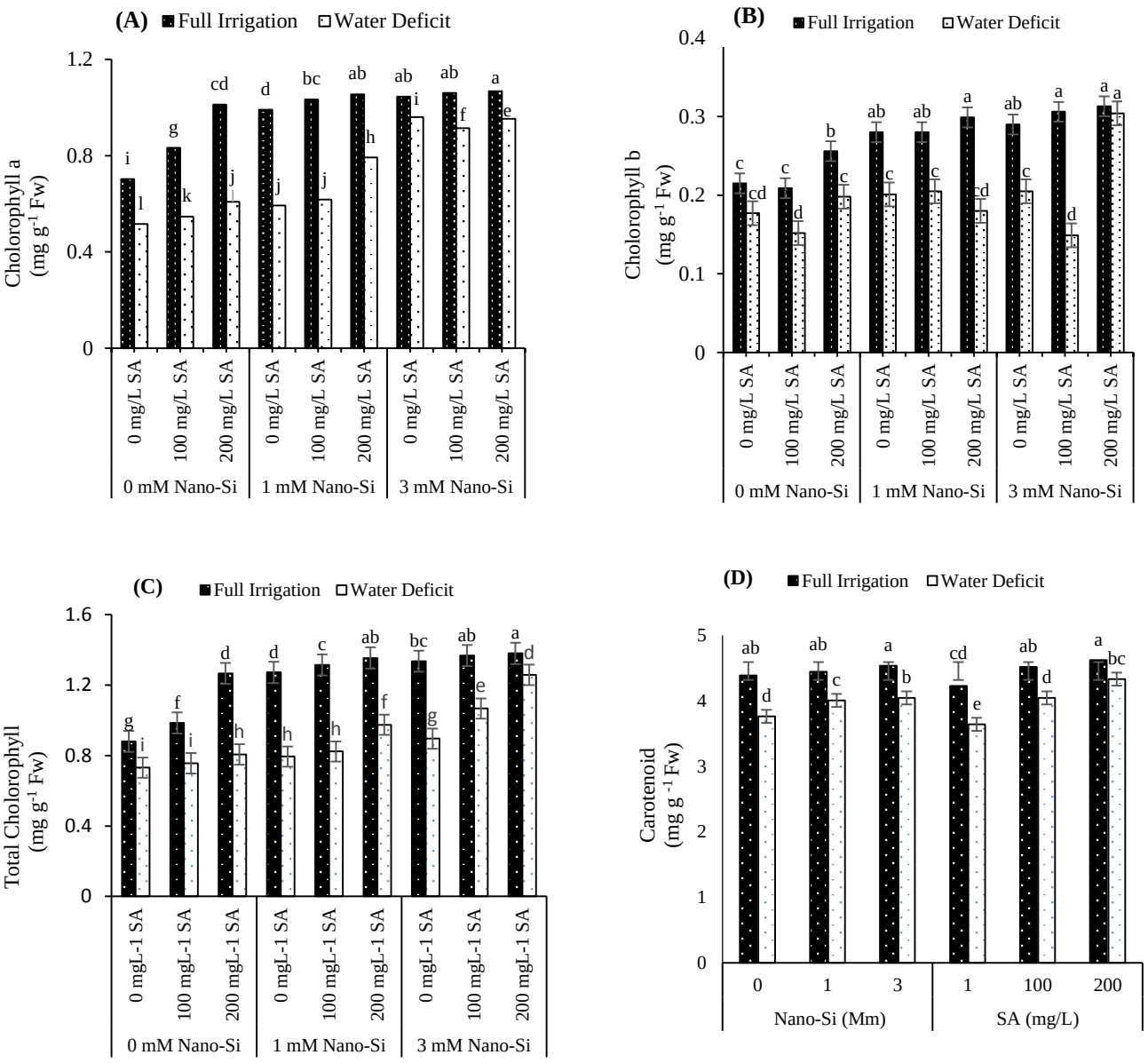
Table 3- Analysis of variance the effects of irrigation, Nano-Silicon and salicylic acid treatments on the photosynthetic pigment content of pinto bean leaves

S.O.V	df	Mean of squares			
		Cholorophyll a	Cholorophyll b	Total cholorophyll	Carotenoid
Block	2	0.002^{ns}	0.001^{ns}	0.004^{ns}	1.820^{*}
Irrigation (I)	1	1.096^{**}	0.039^{ns}	1.55^{**}	2.737^{*}
Error a	2	0.001	0.003	0.001	0.064
Nano-Silicon (Nano-Si)	2	0.288^{**}	0.017^{**}	0.444^{**}	0.446^{**}
Salicylic acid (SA)	2	0.113^{**}	0.008^{**}	0.165^{**}	1.352^{**}
I × Nano-Si	2	0.027^{**}	0.015^{**}	0.041^{**}	0.126^{**}
I × SA	2	0.003^{**}	0.001^{ns}	0.001^{*}	0.100^{*}
Nano-Si × SA	4	0.006^{**}	0.003^{**}	0.005^{**}	0.031^{ns}
I×Nano-Si × SA	4	0.025^{**}	0.007^{**}	0.041^{**}	0.014^{ns}
Error b	32	0.000028	0.00	0.00	0.019
CV (%)		1.98	9.51	1.80	3.26

ns، * و ** به‌ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

ns, *, and ** indicate non-significance and significance at the 5% and 1% probability levels, respectively

اثرات تیمارهای آبیاری، نانوسیلیکون و اسیدسالیسیلیک و اثرات دوجانبه آبیاری × نانوسیلیکون، آبیاری × اسیدسالیسیلیک بر محتوای کاروتنوئید برگ معنی‌دار بود، ولی اثرات متقابل دوجانبه نانوسیلیکون × اسیدسالیسیلیک و تأثیر متقابل سه‌جانبه آبیاری × نانوسیلیکون × اسیدسالیسیلیک بر محتوای کاروتنوئید برگ معنی‌دار نبود (جدول۳). قطع آبیاری به‌طور معنی‌داری موجب کاهش محتوای کلروفیل a، کلروفیل کل و کاروتنوئید برگ‌های لوبیا چیتی شد. همچنین در هر دو سطح آبیاری با کاربرد غلظت‌های مختلف اسیدسالیسیلیک و نانوسیلیکون میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی برگ‌ها افزایش یافت، امّا کاربرد توام نانوسیلیکون و اسیدسالیسیلیک در هر دو سطح آبیاری (آبیاری کامل و قطع آبیاری در مرحله گلدهی)، سبب شد تا برگ‌های لوبیا چیتی از رنگیزه‌های فتوسنتزی بیشتری برخوردار باشند، که این امر نشان‌دهنده اثر هم‌افزایی کاربرد این دو ترکیب است. کاربرد ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر اسیدسالیسیلیک، محتوای کلروفیل a را در شرایط آبیاری کامل به ترتیب ۱۸/۴۹ و ۴۳/۹۵ درصد و در شرایط تنش کم‌آبی ۶/۰۱ و ۱۷/۸۳ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش داد. همچنین کاربرد ۱ و ۳ میلی مولار نانوسیلیکون، محتوای کلروفیل a را به ترتیب ۴۲/۱۱ و ۴۸/۶۵ درصد، در شرایط آبیاری کامل و ۱۴/۹۲ و ۸۶/۰۵ درصد در شرایط تنش کم‌آبی نسبت به تیمار شاهد افزایش داد (شکل ۱A).



شکل ۱- تأثیر تیمارهای آبیاری، محلول‌پاشی نانوسیلیکون و اسیدسالیسیلیک بر محتوای کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و کاروتنوئید در برگ لوبیا چیتی. تیمارهای دارای حداقل یک حرف مشترک اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد ندارند.

Figure 1- The effects of irrigation and salicylic acid treatment on chlorophyll a, chlorophyll b, total chlorophyll and carotenoid of pinto bean leaves. Means with similar letters in each column are not significantly different at 5% level of probability

محتوای کلروفیل b در اثر کاربرد ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر اسیدسالیسیلیک، در شرایط آبیاری کامل و ۱ میلی مولار نانوسیلیکون در شرایط تنش کم‌آبی اختلاف معنی داری با تیمار شاهد نداشت، ولی کاربرد ۳ میلی مولار نانوسیلیکون در شرایط تنش کم‌آبی میزان کلروفیل b را ۱۱/۸۶ درصد افزایش داد (شکل ۱B). در شرایط آبیاری کامل، محتوی کلروفیل کل در اثر کاربرد ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی-گرم در لیتر اسیدسالیسیلیک به ترتیب به میزان ۱۱/۹۳ و ۴۳/۸۶ درصد نسبت به تیمارشاهد افزایش یافت، ولی در شرایط تنش کم‌آبی، اختلاف معنی‌داری بین دو سطح اسیدسالیسیلیک مشاهده نشد (شکل ۱C). بیش‌ترین میزان کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل هم در شرایط آبیاری

کامل و هم در شرایط تنش کم‌آبی با کاربرد توام ۳ میلی-مولار نانوسیلیکون و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر اسید سالیسیلیک مشاهده شد. این ترکیب تیماری موجب افزایش ۵۱/۹۲ و ۸۴/۶۹ درصدی محتوای کلروفیل a (شکل ۱A)، ۴۵/۵۸ و ۷۷/۴۰ درصدی محتوای کلروفیل b برگ (شکل ۱B)، ۵۶/۸۲ و ۷۲/۰۹ درصدی کلروفیل کل (شکل ۱C) نسبت به تیمار شاهد به‌ترتیب تحت شرایط آبیاری کامل و تنش کم‌آبی شد. کاربرد نانوسیلیکون در شرایط آبیاری کامل، اثر معنی‌داری بر میزان کاروتنوئید نداشت، ولی در شرایط تنش کم‌آبی، کاربرد ۱ و ۳ میلی مولار نانوسیلیکون میزان کاروتنوئید را به ترتیب به میزان ۶/۵۴ و ۷/۶۱ درصد افزایش داد. کاربرد ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر اسیدسالیسیلیک ، میزان کاروتنوئید را در شرایط آبیاری کامل به ترتیب به میزان ۶/۸ و ۹/۳ درصد و در شرایط تنش کم‌آبی به طور معنی‌داری به میزان ۱۱/۱۰ و ۱۸/۹۲ درصد در مقایسه با تیمار شاهد افزایش دادکه این امر نشان دهنده تأثیر بیشتر این دو تیمار در شرایط قطع آبیاری است (شکل ۱D).

فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی

تأثیر آبیاری، نانو سیلیکون و اسید سالیسیلیک و اثرات متقابل سه‌جانبه آبیاری × نانوسیلیکون × اسیدسالیسیلیک بر فعالیت آنزیم کاتالاز، پراکسیداز و پلی‌فنل‌اکسیداز معنی‌دار بود (جدول ۴). با اعمال تنش کم‌آبی انتهای فصل، میزان فعالیت آنزیم کاتالاز، با دو برابر افزایش از ۱/۶۵ به ۳/۵۸ واحد بر میلی‌گرم پروتئین رسید (شکل ۲A). محلول‌پاشی بوته‌های لوبیا چیتی توسط نانو سیلیکون و اسید سالیسیلیک سبب شد تا میزان فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، هم در شرایط آبیاری کامل و و هم در شرایط تنش کم‌آبی به‌طور معنی‌داری افزایش یابد. کاربرد ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر اسیدسالیسیلیک، فعالیت آنزیم کاتالاز را در شرایط آبیاری کامل به ترتیب ۷۸/۲۴ و ۱۷۲/۴۶درصد و در شرایط تنش کم‌آبی ۶۱/۰۹ و ۸۵/۹۲ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش داد. همچنین کاربرد ۱ و ۳ میلی‌مولار نانوسیلیکون، فعالیت آنزیم کاتالاز را به ترتیب ۶۸/۵۴ و ۸۲/۱۹ درصد، در شرایط آبیاری کامل و ۸/۸۳ و ۶۶/۵۷ درصد در شرایط تنش کم‌آبی نسبت به تیمار شاهد افزایش داد (شکل ۲A). افزایش غلظت نانوسیلیکون از ۱ به ۳ میلی‌مولار و اسیدسالیسیلیک از ۱۰۰ به ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر نیز تأثیر مثبت و معنی‌داری را در بهبود فعالیت این آنزیم‌ها داشت. اگرچه کاربرد هر کدام از این تیمارها (نانوسیلیکون و اسیدسالیسیلیک) به‌طور جداگانه روی فعالیت آنزیم کاتالاز تأثیر مثبت و معنی‌داری داشت، اما بیشترین تأثیر زمانی مشاهده شد که این دو تیمار به‌طور همزمان مورد استفاده قرار گرفتند. بیش‌ترین فعالیت آنزیم کاتالاز (۷/۴۷ واحد بر میلی‌گرم پروتئین)، با محلول‌پاشی توام ۳ میلی‌مولار نانوسیلیکون و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر اسیدسالیسیلیک تحت شرایط تنش کم‌آبی مشاهده شد که نسبت به تیمار شاهد، ۹۴/۰۳ درصد افزایش داشت (شکل ۲A).

محلول‌پاشی ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر اسیدسالیسیلیک، فعالیت آنزیم پراکسیداز را نسبت به تیمار شاهد هم در شرایط آبیاری کامل و هم در شرایط کم‌آبی به‌طور معنی‌داری افزایش داد، امّا اختلاف معنی‌داری بین این دو تیمار در شرایط آبیاری کامل مشاهده نشد. محلول‌پاشی ۱ و ۳ میلی‌مولار نانوسیلیکون، فعالیت آنزیم پراکسیداز را هم در شرایط آبیاری کامل و هم در شرایط کم‌آبی به‌طور معنی‌داری افزایش داد، ولی بین تیمار ۱ میلی‌مولار نانوسیلیکون و تیمار شاهد در شرایط آبیاری کامل اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. بیشترین میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز (۴۰/۳۳ واحد بر میلی‌گرم پروتئین) با محلول‌پاشی توام ۳ میلی‌مولار نانوسیلیکون و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر اسیدسالیسیلیک تحت شرایط قطع آبیارتنش کم‌آبی مشاهده شد که ۱۲/۳۹ درصد بیشتر از همین تیمار در شرایط آبیاری کامل بود (شکل ۲B).

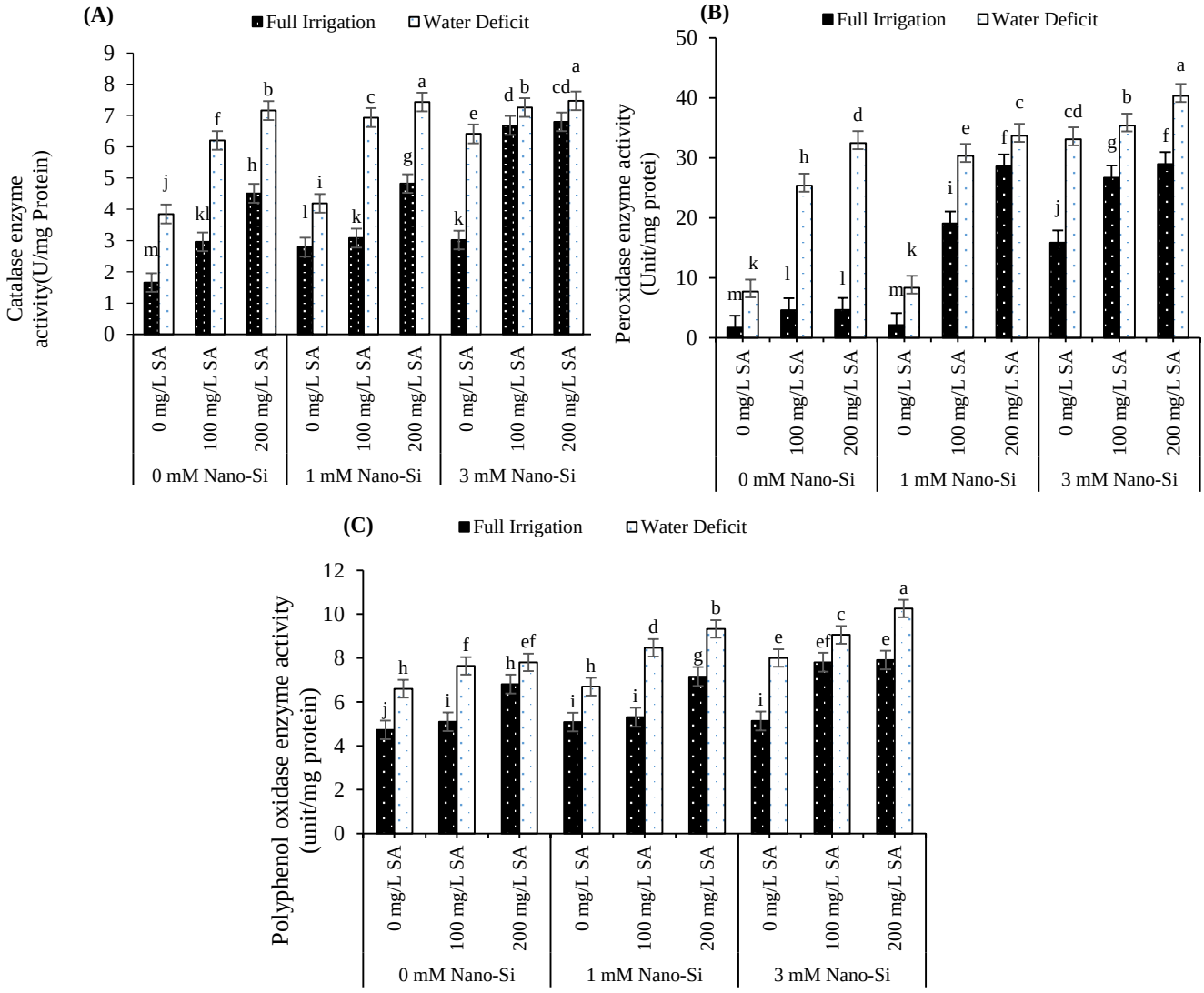
جدول ۴- تجزیه واریانس تأثیر تیمار آبیاری، نانوسیلیکون و اسیدسالیسیلیک بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در برگ لوبیا چیتی

Table 4- Analysis of variance the effects of irrigation, Nano-Silicon and salicylic acid treatments on antioxidant enzyme activity of pinto bean leaves

S.O.V	df	Mean of squares		
		Catalase enzyme activity	Peroxidase enzyme activity	Polyphenol oxidase enzyme activity
Block	2	0.03^{ns}	0.471^{ns}	0.02^{ns}
Irrigation (I)	1	70.81^{**}	2183.26^{**}	60.23^{**}
Error a	2	0.02	1.73	0.02
Nano-Silicon (Nano-Si)	2	17.27^{**}	1356.47^{**}	11.50^{**}
Salicylic acid (SA)	2	34.64^{**}	1331.2^{**}	21.32^{**}
I × Nano-Si	2	1.88^{**}	128.7^{**}	0.37^{**}
I × SA	2	0.40^{**}	29.76^{**}	0.33^{**}
Nano-Si × SA	4	0.61^{**}	114.44^{**}	0.65^{**}
I×Nano -Si × SA	4	3.07^{**}	99.9^{**}	1.38^{**}
Error b	32	0.01	0.40	0.01
CV (%)		2.07	3.01	3.01

^{ns}، * و ** به‌ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

^{ns}, *, and ** indicate non-significance and significance at the 5% and 1% probability levels, respectively



شکل ۲- تأثیر تیمارهای آبیاری، محلول‌پاشی نانوسیلیکون و اسیدسالیسیلیک بر فعالیت آنزیم کاتالاز، پراکسیداز و پلی فنل اکسیداز در برگ لوبیا چیتی

. تیمارهای دارای حداقل یک حرف مشترک اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

Figure 2- The effects of irrigation and salicylic acid treatment on catalase enzyme activity, peroxidase and polyphenol oxidase of pinto bean leaves. Means with similar letters in each column are not significantly different at 5% level of probability

در شرایط آبیاری کامل، کاربرد ۱۰۰میلی‌گرم در لیتر اسیدسالیسیلیک، اختلاف معنی‌داری با تیمار شاهد نداشت، امّا کاربرد ۲۰۰میلی‌گرم در لیتر آن سبب افزایش ۴۴/۰۸ درصدی فعالیت آنزیم پلی‌فنل اکسیداز شد. بین تیمار شاهد، ۱ و ۳ میلی‌مولار نانوسیلیکون در شرایط آبیاری کامل، اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد، ولی در شرایط تنش کم‌آبی، تیمار ۳ میلی‌مولار نانوسیلیکون، فعالیت آنزیم پلی‌فنل اکسیداز را ۲/۲۹ درصد افزایش داد. (شکل C ۲). بیشترین میزان فعالیت آنزیم پلی‌فنل اکسیداز در ترکیب تیماری ۲۰۰میلی‌گرم در لیتر و ۳ میلی‌مولار نانوسیلیکون مشاهده شد که نسبت به تیمار شاهد ۵۵/۴۸ درصد افزایش یافت و این امر نشان‌دهنده اثر هم‌افزایی کاربرد این دو ترکیب است(شکل ۲C).

پراکسید هیدروژن

نتایج تجزیه واریانس نشان داد محتوای پراکسید هیدروژن به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر آبیاری، نانوسیلیکون، اسیدسالیسیلیک و اثرات متقابل آبیاری × نانوسیلیکون × اسیدسالیسیلیک قرار گرفت (جدول ۵). با قطع آبیاری در مرحله گلدهی، میزان پراکسید هیدورژن برگ‌های لوبیا چیتی را تحت تأثیر قرارداد و میزان آن را در حدود ۴۷/۹۸ درصد افزایش داد (شکل ۳A).

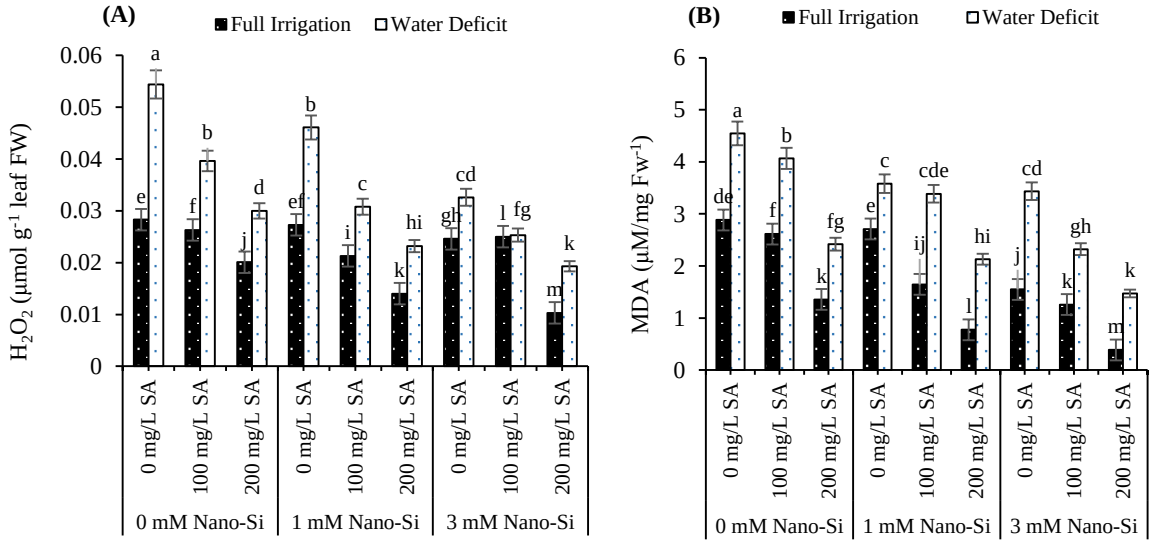
جدول ۵- تجزیه واریانس تأثیر تیمار آبیاری، نانوسیلیکون و اسیدسالیسیلیک بر محتوی پراکسیدهیدروژن، مالون‌دی‌آلدهید و عملکرد دانه لوبیا چیتی

Table 5- Analysis of variance the effects of irrigation, Nano-Silicon and salicylic acid treatments on H_2O_2, MDA and Grain yield of pinto bean

S.O.V	df	Mean of squares		
		H_2O_2	MDA	Grain yield
Block	2	0.0000011^{ns}	0.36*	147692*
Irrigation (I)	1	0.0025**	24.74**	988166**
Error a	2	0.0000012	0.05	8537
Nano-Silicon (Nano-Si)	2	0.00069**	6.95**	132402**
Salicylic acid (SA)	2	0.0011**	13.39**	393287**
I × Nano-Si	2	0.000052**	0.006^{ns}	3113**
I × SA	2	0.000078**	0.12**	17600**
Nano-Si × SA	4	0.000018**	0.13**	2048*
I×Nano -Si × SA	4	0.000039**	0.31**	6529**
Error b	32	0.00000012	0.01	638
CV (%)		4.06	5.81	1.76

^{ns}، * و ** به‌ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

^{ns}, *, and ** indicate non-significance and significance at the 5% and 1% probability levels, respectively



شکل۳- تأثیر تیمارهای آبیاری، محلول‌پاشی نانوسیلیکون و اسیدسالیسیلیک بر فعالیت پراکسید هیدروژن و مالون‌دی آلدهید در برگ لوبیا چیتی .
تیمارهای دارای حداقل یک حرف مشترک اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

Figure 3- The effects of irrigation and salicylic acid treatment on H_2O_2 and MDA of pinto bean leaves. Means with similar letters in each column are not significantly different at 5% level of probability

در دو سطح آبیاری، کاربرد نانوسیلیکون و اسیدسالیسیلیک سبب شد تا میزان پراکسید هیدورژن برگ‌های لوبیا چیتی به‌طور معنی‌داری کاهش یابد. کاربرد ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر اسیدسالیسیلیک، میزان پراکسیدهیدروژن را در شرایط آبیاری کامل به ترتیب ۷/۰۷ و ۲۸/۹۸درصد و در شرایط تنش کم‌آبی ۲۷/۲۱ و ۴۴/۸۵ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش داد. همچنین کاربرد ۱ و ۳ میلی مولار نانوسیلیکون، میزان پراکسیدهیدروژن را به ترتیب ۳/۵۳ و۱۳/۰۷ درصد، در شرایط آبیاری کامل و ۱۵/۲۶ و۴۰/۰۷ درصد در شرایط تنش کم‌آبی نسبت به تیمار شاهد کاهش داد (شکل ۳A). اگرچه کاربرد نانوسیلیکون و اسیدسالیسیلیک به‌تنهایی محتوای پراکسید هیدروژن را کاهش می‌دهد، امّا بیشترین تأثیر زمانی مشاهده شد که این دو تیمار به‌طور توام مورد استفاده قرار گرفت. به‌نظر می‌رسد، برهم‌کنش این تیمارها به‌علّت اثر هم‌افزایی موجب کاهش بیشتر محتوای پراکسید هیدروژن می‌شود. محلول‌پاشی توام ۳ میلی‌مولار نانوسیلیکون و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر اسیدسالیسیلیک در شرایط آبیاری کامل و تنش کم‌آبی به ترتیب منجر به کاهش ۶۳/۶ و ۶۴/۵۲ محتوای پراکسید هیدروژن نسبت به تیمار عدم مصرف نانوسیلیکون و اسیدسالیسیلیک شد (شکل ۳A).

مالون‌دی‌آلدهید

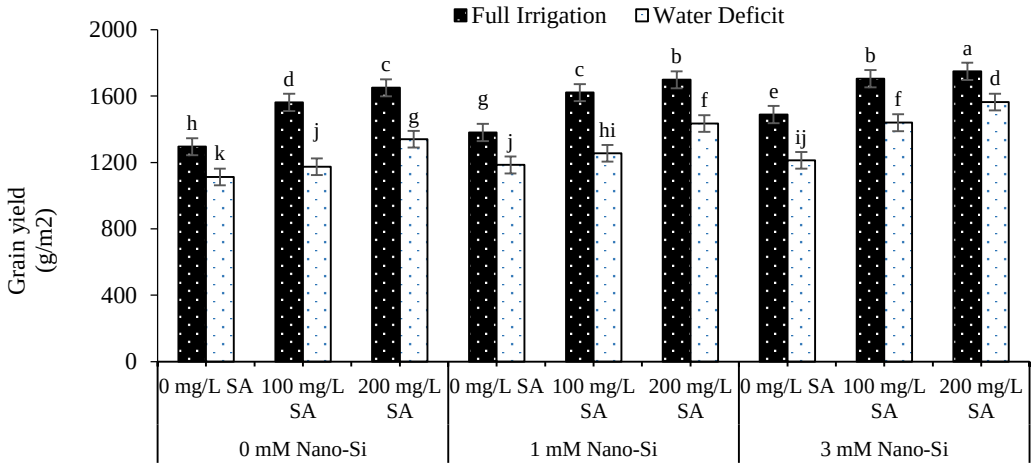
تیمارهای مورد بررسی بر محتوای مالون‌دی‌آلدهید برگ تأثیر معنی‌داری داشت، به‌طوری که نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر آبیاری، نانوسیلیکون، اسیدسالیسیلیک و اثرات متقابل سه‌جانبه آبیاری × نانوسیلیکون × اسیدسالیسیلیک بر محتوای مالون‌دی‌آلدهید برگ معنی‌دار بود، در حالی که اثرات دوجانبه آبیاری × نانوسیلیکون بر این صفت معنی‌دار نبود (جدول ۵). اعمال تنش کم‌آبی در مرحله گلدهی موجب افزایش معنی‌دار محتوای مالون‌دی‌آلدهید برگ لوبیا چیتی به میزان ۵۷/۷۵ درصد شد (شکل ۳B).

در شرایط آبیاری، کاربرد غلظت۱و ۳ میلی مولار نانوسیلیکون سبب کاهش محتوای مالون‌دی‌آلدهید در برگ لوبیا چیتی شد، امّا این کاهش در غلظت ۱ میلی‌مولار

معنی‌دار نبود. میزان کاهش مالون‌دی‌آلدهید در این شرایط به ترتیب ۹/۷۳ و۴۶/۲۷ درصد نسبت به تیمار شاهد بود (شکل 3B). در شرایط تنش کم‌آبی، کاربرد سطوح ۱ و ۳ میلی‌مولار نانوسیلیکون سبب کاهش معنی‌دار محتوای مالون‌دی‌آلدهید شدند که این کاهش به ترتیب ۲۱/۲۶ و۲۴/۴۵ درصد نسبت به تیمار شاهد بود. کاربرد ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر اسیدسالیسیلیک، میزان مالون‌دی‌آلدهید را در شرایط آبیاری کامل به ترتیب ۲۴/۴۵ و ۵۳ درصد و در شرایط تنش کم‌آبی ۱۰/۶۲ و ۴۶/۸۱ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش داد. در این شرایط اگرچه کاربرد نانوسیلیکون و اسیدسالیسیلیک به‌تنهایی منجر به کاهش معنی‌دار محتوای مالون‌دی‌آلدهید برگ شد، امّا کاربرد توام این دو ترکیب در هر دو سطح آبیاری، سبب شد تا بوته‌های لوبیا چیتی محتوای مالون‌دی‌آلدهید برگ کمتری داشته باشند، به‌طوری که محلول‌پاشی ۳ میلی‌مولار نانوسیلیکون و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر اسیدسالیسیلیک هم در شرایط آبیاری کامل (۰/۳۸۷ میکرومول بر میلی‌گرم وزن تر برگ) و هم در شرایط تنش کم‌آبی (۱/۴۷۱ میکرومول بر میلی‌گرم وزن تر برگ) به طور معنی‌داری کم‌تر از سایر تیمارها بود (شکل B ۳).

عملکرد دانه

عملکرد دانه در واحد سطح به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر تیمارهای آزمایشی قرار گرفت، به‌طوری که نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر متقابل سه‌جانبه آبیاری × نانوسیلیکون × اسیدسالیسیلیک بر عملکرد دانه در واحد سطح لوبیا چیتی معنی‌دار بود (جدول ۵). محدودیت آبی، عملکرد دانه در واحد سطح را به‌طور معنی‌داری کاهش داد و موجب کاهش ۱۴/۱۸ درصدی عملکرد دانه شد (شکل ۴). اگرچه قطع آبیاری در مرحله گلدهی موجب کاهش عملکرد دانه لوبیا چیتی شد، امّا کاربرد غلظت‌های مختلف نانوسیلیکون و اسیدسالیسیلیک سبب شد تا عملکرد دانه در واحد سطح افزایش معنی‌داری هم در شرایط آبیاری و هم در شرایط تنش کم‌آبی انتهای فصل داشته باشد. کاربرد ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر اسیدسالیسیلیک، میزان عملکرد دانه را در شرایط آبیاری کامل به ترتیب ۲۰/۶۲ و ۲۷/۴۲ درصد و در شرایط تنش کم‌آبی ۵/۵۹ و ۲۰/۴۹ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش داد. در هر دو سطح آبیاری، کاربرد غلظت‌های ۱و ۳ میلی‌مولار نانوسیلیکون موجب افزایش عملکرد دانه در مقایسه با تیمار شاهد شد، به‌طوری که ۱و ۳ میلی‌مولار نانوسیلیکون میزان عملکرد دانه را در شرایط آبیاری کامل به ترتیب ۶/۶۷ و ۱۴/۹۸ درصد و در شرایط تنش کم‌آبی ۶/۵۷ و ۹/۱۱ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش داد (شکل ۴). کاربرد همزمان این دو ترکیب در هر دو سطح آبیاری، اثر بیشتری بر افزایش عملکرد دانه داشت. کاربرد توام ۳ میلی‌مولار نانوسیلیکون و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر اسیدسالیسیلیک موجب افزایش ۴۰/۶۴ و ۳۴/۹۵ درصدی عملکرد دانه در واحد سطح نسبت به تیمار شاهد به‌ترتیب تحت شرایط تنش کم‌آبی و آبیاری کامل شد (شکل ۴).



شکل ۴- تأثیر تیمارهای آبیاری، محلول‌پاشی نانوسیلیکون و اسیدسالیسیلیک بر میزان مالون دی آلدهید در برگ لوبیا چیتی . تیمارهای دارای حداقل یک حرف مشترک اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

Figure 4- The effects of irrigation and salicylic acid treatment on Grain yield of pinto bean leaves. Means with similar letters in each column are not significantly different at 5% level of probability

بحث

یکی از بارزترین آثار فیزیولوژیک تنش خشکی، کاهش محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی است. این کاهش می‌تواند ناشی از مهار بیوسنتز کلروفیل، تسریع در تجزیه آن، یا ترکیبی از هر دو سازوکار باشد (Fahad et al., 2017). در شرایط محدودیت آبی، گیاه با بستن روزنه‌ها به حفظ آب کمک می‌کند، امّا این امر سبب کاهش دسترسی به دی‌اکسیدکربن و در نتیجه، کاهش فتوسنتز می‌شود. در چنین شرایطی، تولید گونه‌های فعال اکسیژن(ROS) در کلروپلاست افزایش پیدا می‌کند. این رادیکال‌های آزاد با تخریب ماکرومولکول‌ها و پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی، به ساختار سلول آسیب می‌رسانند (Qiao et al., 2024). به‌طور مشخص، کاهش کلروفیل تحت تنش خشکی با افزایش تولید ROS مرتبط است و از راه افزایش پراکسیداسیون، تجزیه این رنگیزه‌ها را تسریع می‌کند (Sharifa & Muriefah, 2015). یکی از محصولات نهایی پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی، مالون‌دی‌آلدهید (MDA) است که به‌عنوان شاخصی کلیدی برای ارزیابی میزان آسیب غشاها مورد استفاده قرار می‌گیرد (Yekti et al., 2018). گیاهان برای مقابله با تولید بیش از حد رادیکال‌های آزاد اکسیژن، از پاسخ آنتی‌اکسیدانی استفاده می‌کنند (Raziq et al., 2022). آنتی‌اکسیدان‌هایی مانند کاتالاز، پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز توسط گیاهان به عنوان محافظت‌کننده در برابر آسیب‌های اکسایشی ناشی از عوامل محیطی مانند خشکی تولید می‌شوند (Patane et al., 2022). مطابق با پژوهش حاضر، افزایش آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در اثر تنش خشکی در نخود (Farooq et al., 2021) و کلزا (Rostami et al., 2023) گزارش شده است.

به نظر می‌رسد سیلیکون توسط سازوکارهای متعددی اثرات مخرب تنش خشکی را کاهش می‌دهد. سیلیکون با رسوب در بافت‌های برگ، علاوه بر افزایش استحکام مکانیکی، موجب افزایش غلظت کلروفیل در واحد سطح می‌شود (Liu et al., 2019). این عنصر با تقویت دیواره سلولی، از تجزیه پروتئین‌ها محافظت کرده و پایداری غشاها را در شرایط تنش حفظ می‌کند (Yan et al., 2023). نقش سیلیکون در افزایش محتوای کلروفیل را می‌توان عمدتاً به توانایی آن در افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و در نتیجه، کاهش خسارت ROS به کلروپلاست‌ها نسبت داد (Sun et al., 2021). گزارش شده است که نانو ذرات سیلیکون توانایی کاهش تنش اکسیداتیو در گیاه نخود و

گیاهچه کاملینا (*Camelina sativa* L.) را توسط افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و کاهش سطح ROS دارا هستند(Teimoori et al., 2024; Desoky et al., 2025). این یافته‌ها تأئید می‌کنند که سیلیکون با افزایش فعالیت آنزیم‌هایی مانند پراکسیداز و کاتالاز، محتوای پراکسید هیدروژن و رادیکال‌های آزاد را کاهش داده و از تخریب سلول‌های گیاهی جلوگیری می‌کند (Shen et al., 2010).

از سوی دیگر، اسیدسالیسیلیک (SA) به‌عنوان یک مولکول پیام‌رسان، پاسخ‌های دفاعی گیاه را توسط تنظیم فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی القا می‌کند (Renhua et al., 2008). این افزایش فعالیت آنزیمی نقش حیاتی در حفظ یکپارچگی غشاهای سلولی ایفا می‌کند (Sapakhova et al., 2022). بر اساس نظر پژوهشگران، اسیدسالیسیلیک از یک سو با القای حالت آماده‌باش دفاعی در گیاه و از سوی دیگر با عمل کردن به‌عنوان یک دهنده الکترون برای آنزیم‌هایی مانند کاتالاز و پراکسیداز، موجب افزایش فعالیت این آنزیم‌ها می‌شود (Hayat et al., 2010). افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان تحت تأثیر اسیدسالیسیلیک در گندم نیز مشاهده شده است که با نتایج پژوهش حاضر همخوانی دارد (Kolupaev et al., 2018). اسیدسالیسیلیک توسط تقویت سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی در بخش آنزیمی و بخش غیرآنزیمی(کاروتنوئیدها و کلروفیلb) موجب محافظت کلروفیل در برابر آسیب اکسیداتیو می‌شود (Miura & Tada, 2014; Emrahi et al., 2021).

به نظر می‌رسد اثر هم‌افزایی مشاهده‌شده از کاربرد توأم نانوسیلیکون و اسیدسالیسیلیک در کاهش آسیب‌های اکسیداتیو و بهبود شاخص‌های رشدی، ناشی از عملکرد مکمل و تقویت‌کننده این دو محرک، در مسیرهای دفاعی گیاه باشد. در این راستا، یک سازوکار احتمالی را می‌توان به این شکل بیان کرد: نانوسیلیکون به عنوان یک بستر فیزیکی و ساختاری عمل می‌کند که با رسوب در دیواره سلولی، استحکام مکانیکی را افزایش داده و از نفوذ گونه‌های فعال اکسیژن به درون سلول جلوگیری می‌کند. این امر همچنین با حفظ یکپارچگی غشاها، از بروز پراکسیداسیون لیپیدی می‌کاهد. همزمان، اسیدسالیسیلیک به عنوان یک پیام‌رسان شیمیایی، سیستم دفاعی گیاه را در حالت "آماده‌باش" قرار داده و بیوسنتز و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند کاتالاز، پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز را به طور مستقیم تحریک می‌کند. بنابراین، در این همکاری استراتژیک، نانوسیلیکون با کاهش تولید و نفوذ ROS از بیرون سلول، بار تنش اکسیداتیو را سبک‌تر می‌کند و اسیدسالیسیلیک با تقویت سیستم پاکسازی داخلی (آنتی‌اکسیدان‌ها)، توانایی گیاه برای خنثی‌سازی ROS های باقیمانده را به حداکثر می‌رساند. این تعامل مثبت، محتوای کلروفیل را به‌طور مؤثرتری حفظ کرده، آسیب غشایی را به حداقل می‌رساند و در نهایت، منابع بیشتری را برای تداوم فتوسنتز و رشد گیاه در شرایط تنش خشکی فراهم می‌سازد.

در پژوهش حاضر، استفاده از سیلیکون و اسیدسالیسیلیک فعالیت برخی از آنزیم‌های مهم سیستم دفاع اکسایشی را افزایش داد و سطح پراکسیدهیدروژن و مالون‌دی‌آلدهید را در گیاه تحت تنش خشکی کاهش داد. علاوه بر این، نتایج نشان دادند اثرات هم‌افزایی سیلیکون و اسیدسالیسیلیک بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی بیشتر از اثرات سیلیکون یا اسیدسالیسیلیک به‌صورت جداگانه بود. مشابه با یافته‌های این پژوهش، پژوهشگران دیگری نیز تأثیر مثبت نانوسیلیکون و اسیدسالیسیلیک را در افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، کاهش محتوی پراکسید هیدروژن و مالون‌دی‌آلدهید گزارش کرده اند (Maghsoudi et al., 2019). تنش خشکی با کاهش آب برگ، بسته شدن روزنه-ها و افت فتوسنتز از یک سو و متأثر کردن فعالیت‌های آنزیمی و فرآیندهای مربوطه از سوی دیگر، موجب افت عملکرد دانه توسط کاهش اجزای عملکرد می‌شود (Farokhinia et al., 2011). مطابق با پژوهش حاضر، افزایش عملکرد دانه در اثر محلول‌پاشی نانوسیلیکون

واسیدسالیسیلیک در کلزا و پنبه نیزگزارش شده است (Sajed gollojeh et al., 2020; Barros et al., 2019).

نتیجه‌گیری کلی

اگرچه با اعمال تنش خشکی در مرحله گلدهی میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی و عملکرد دانه کاهش و میزان پراکسیدهیدروژن و مالون‌دی‌آلدهید افزایش یافت، امّا محلول‌پاشی غلظت‌های مختلف نانوسیلیکون و اسیدسالیسیلیک در تمام سطوح آبیاری، تأثیر مثبت و معنی‌داری بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی و عملکرد دانه داشت. در شرایط عدم کاربرد نانوسیلیکون و اسید سالسیلیک نیز میزان آسیب به غشاء بالا بود که به صورت افزایش میزان پراکسیدهیدروژن و مالون‌دی‌آلدهید مشاهده شد. کاربرد غلظت‌های ۳ میلی-مولار نانوسیلیکون و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر اسیدسالیسیلیک به‌تنهایی اگرچه فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی را بهبود بخشید، امّا بیشترین تأثیر زمانی مشاهده شد که این دو تیمار به‌طور توام مورد استفاده قرار گرفت. بیشترین افزایش در محتوای کلروفیل، کاروتنوئید، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و عملکرد دانه با کاربرد توام غلظت ۳ میلی‌مولار نانوسیلیکون و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر اسیدسالیسیلیک به‌دست آمد. به‌نظر می‌رسد نانوسیلیکون و اسیدسالیسیلیک با کنترل آسیب‌های اکسیداتیو و جلوگیری از تخریب کلروفیل و غشاءهای سلولی سبب افزایش رنگیزه‌های فتوسنتزی و بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی شده و در نهایت سبب افزایش عملکرد محصول می‌شود. بنابراین می‌توان محلول‌پاشی نانوسیلیکون و اسیدسالیسیلیک به‌صورت ترکیبی به‌ویژه تلفیق غلظت‌های ۳ میلی‌مولار نانوسیلیکون و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر اسیدسالیسیلیک را به عنوان یک راهکار عملی برای کاهش خسارات ناشی از تنش کم‌آبی و بهبود شاخص‌های فیزیولوژیک مرتبط با تحمل به خشکی در لوبیا چیتی به کشاورزان توصیه نمود.

References

Abbasi, A., Lotfi, R., & Janmohammadi, M. (2018). Response of antioxidant defense mechanism and wheat yield changes to drought stress with application of different concentrations of nano-silicone and nano-titanium. *Iranian Dryland Agronomy Journal*, *7*(1), 79-101. https://doi.org/10.22092/idaj.2018.120366.196 [In Persian]

Adabavazeh, F., Razavizadeh, R., Pourseyedi, S., Nadernejad, N., & Mozafari, H. (2023). Study of the effects of synthesized iron nanoparticle and salicylic acid on change of morphological and physiological characteristics of *Calotropis procera* seedlings. *Journal of Plant Biological Sciences*, *15*(2), 27-50. https://doi.org/10.22108/ijpb.2024.139387.1336 [In Persian]

Alexieva, V., Sergiev, I., Mapelli, S., & Karanov, E. (2001). The effect of drought and ultraviolet radiation on growth and stress markers in pea and wheat. *Plant Cell and Environment*, *24*(1), 1337-1344. https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2001.00778.x

Arndt, S. K., Clifford, S. C., Wanek, W., Joness, H. G., & Popp, M. (2001). Physiological and morphological adaptions of the fruit tree *Ziziphus rotundifolia* in response to progressive drought stress. *Tree Physiology*, *21*(11), 705-715. https://doi.org/10.1093/treephys/21.11.705

Askarnejad, M., Sodaeeizadeh, H., Mosleh Arani, A., Yazdani Biouki, R., & Mavandi, P. (2019). Effect of silicon in improving drought tolerance of stevia (*Stevia rebaudiana Bertoni*) under moisture stress. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, *12*(3), 847-863. https://doi.org/10.22077/escs.2019.1559.1349 [In Persian]

Barros, T. C., de Mello Prado, R., Roque, C. G., Arf, M. V., & Vilela, R. G. (2019). Silicon and salicylic acid in the physiology and yield of cotton. *Journal of Plant Nutrition*, *42*(5), 458-465. https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1567765

Chavoushi, M., Najafi, F., Salimi, A., & Angaji, S. A. (2019). Improvement in drought stress tolerance of safflower during vegetative growth by exogenous application of salicylic acid and sodium nitroprusside. *Industrial Crops and Products*, *134*, 168-176. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.03.071

Chen, H., Sun, J., Li, S., Cui, Q., Zhang, H., & Xin, F. (2016) An ACC oxidase gene essential for *cucumber* carpel development. *Molecular Plant*, *9*, 1315-1327. http://dx.doi.org/10.1016/j.molp.2016.06.018

Chen, T., & Zhang, B. (2016). Measurements of proline and malondialdehyde content and antioxidant enzyme activities in leaves of drought stressed Cotton. *Bio-Protocol*, *6*(17), 1-14. https://doi.org/10.21769/BioProtoc.1913

Chen, Y. E., Cui, J., Li, G. X. M., Yuan, M., Zhang, Z. W., Yuan, S., & Zhang, H. Y. (2015). Effect of salicylic acid on the antioxidant system and photosystem II in wheat seedlings. *Biologia Plantarum*, *60*(1), 139-147. https://doi.org/10.1007/s10535-015-0564-4

Desoky, E. S. M., Mahmood, M., Feng, D., Ahmed, A. F., Al Masoudi, L. M., Alahmari, A. S., & Taha, N. A. (2025). Synergistic effects of clove fruit extract and nano-silicon to enhance drought resilience and productivity of soybean through improved plant defense mechanisms. *BMC Plant Biology*, *25*(1), 236-258. https://doi.org/10.1186/s12870-025-06234-1

Emrahi, R., Morshedloo, M. R., Ahmadi, H., Javanmard, A., & Maggi, F. (2021). Intraspecific divergence in phytochemical characteristics and drought tolerance of two carvacrol-rich *Origanum vulgare* subspecies: Subsp. *hirtum* and subsp. gracile. *Industrial Crops and Products*, *168*, 113557. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113557

Fahad, S., Bajwa, A. A., Nazir, U., Anjum, S. A., Farooq, A., Zohaib, A., & Saud, S. (2017). Crop production under drought and heat stress: plant responses and management options. *Frontiers in Plant Science*, *8*, 11-27. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01147

Farokhinia, M., Roshdi, M., Pasban Eslam, B., & Sasandoost, R. (2011). Study of some physiological traits and yield in spring safflower under water deficit stress. *Iranian Journal of Field Crop Science*, *42*(3), 545-553. https://ijfcs.ut.ac.ir/article_23352_b23bf05a2925a65f6a957b47e4277848.pdf [In Persian]

Farooq, M., Ahmad, R., Shahzad, M., Sajjad, Y., Hassan, A., Shah, M. M., & Khan, S. A. (2021). Differential variations in total flavonoid content and antioxidant enzymes activities in pea under different salt and drought stresses. *Scientia Horticulturae*, *287*, 110258. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110258

Gong, H. J., Chen, K. M., Chen, G. C., Wang, S. M., & Zhang, C. L. (2003). Effects of silicon on growth of wheat under drought. *Journal of Plant Nutrition*, *26*(5), 1055–1063. https://doi.org/10.1081/PLN-120020075

Habibi, G. (2012). Exogenous salicylic acid alleviates oxidative damage of barley plants under drought stress. *Acta Biologica Szegediensis*, *56*(1), 57-63. https://abs.bibl.u-szeged.hu/index.php/abs/article/view/2770

Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Anee, T. I., Khan, M. I. R., & Fujita, M. (2018). Silicon-mediated regulation of antioxidant defense and glyoxalase systems confers drought stress tolerance in *Brassica napus* L. *South African Journal of Botany*, *115*, 50-57. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2017.12.006

Hattori, T., Inanaga, S., Araki, H., An, P., Morita, S., Luxova, M., & Lux, A. (2005). Application of silicon enhanced drought tolerance in *Sorghum bicolor*. *Physiologia Plantarum*, *123*(4), 459-466. https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2005.00481.x

Hayat, Q., Hayat, S., Irfan, M., & Ahmad, A. (2010). Effect of exogenous salicylic acid

under changing environment: a review. *Environmental and Experimental Botany*, *68*(1), 14-25. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.08.005

Hussain, S., Rao, M. J., Anjum, M. A., Ejaz, S., Zakir, I., Ali, M. A., & Ahmad, S. (2019). Oxidative stress and antioxidant defense in plants under drought conditions. *Plant abiotic stress tolerance: Agronomic, Molecular and Biotechnological Approaches*, 207-219. https://doi.org/10.1007/978-3-030-06118-09

Idrees, M., Naeem, M., Aftab, T., & Khan, M. M. A. (2013). Salicylic acid restrains nickel toxicity, improves antioxidant defiance system and enhances the production of anticancer alkaloids in *Catharanthus roseus* (L.). *Journal of Hazardous Materials*, *252*, 367-374. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.03.005

Jonoubi, P., & Arang, M. (2024). The effect of exogenous gibberellic acid and naphthalene acetic acid on sex determination and yield components of *Cucumber* (*Cucumis sativus* L.) cultivar Supernia F_1. *Journal of Plant Biological Sciences*, *16*(2), 55-70. https://doi.org/10.22108/ijpb.2025.144089.1393 [In Persian]

Kang, J., Chu, Y., Ma, G., Zhang, Y., Zhang, X., Wang, M., & Wang, C. (2023). Physiological mechanisms underlying reduced photosynthesis in wheat leaves grown in the field under conditions of nitrogen and water deficiency. *The Crop Journal*, *11*(2), 638-650. https://doi.org/10.1016/j.cj.2022.06.010

Kapoor, D., Bhardwaj, S., Landi, M., Sharma, A., Ramakrishnan, M., & Sharma, A. (2020). The impact of drought in plant metabolism: How to exploit tolerance mechanisms to increase crop production. *Applied Sciences*, *10*(16), 5692. https://doi.org/10.3390/app10165692

Karo, M., & Mishra, D. (1976). Catalase, peroxidase, and polyphenol oxidase activities during rice leaf senescence. *Plant Physiology*, *57*, 315-319. https://doi.org/10.1104/pp.57.2.315

Kolupaev, Y. E., Karpets, Y. V., Yastreb, T. O., & Lugovaya, A. A. (2018). Combined effect of salicylic acid and nitrogen oxide donor on stress-protective system of wheat plants under drought conditions. *Applied Biochemistry and Microbiology*, *54*(4), 418-424. https://doi.org/10.1134/S0003683818040099

Lichtenthaler, H. K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*, *148*(11), 350-382. https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1

Liu, B., Soundararajan, P., & Manivannan, A. (2019). Mechanisms of silicon-mediated amelioration of salt stress in plants. *Plants*, *8*(9), 307. https://doi.org/10.3390/plants8090307

Luyckx, M., Hausman, J., Lutts, S., & Guerriero, G. (2017). Silicon and plants: current knowledge and technological perspectives. Front. *Frontiers Plant Science*. *8*, 411-419. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00411

Ma, J. F., & Yamaji, N. (2006). Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends Plant Science*, *11*, 392–397. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2006.06.007

Maghsoudi, K., Emam, Y., Ashraf, M., & Arvin, M. J. (2019). Alleviation of field water stress in wheat cultivars by using silicon and salicylic acid applied separately or in combination. *Crop and Pasture Science*, *70*(1), 36-43. https://doi.org/10.1071/CP18213

Maghsoudi, K., Emam, Y., & Ashraf, M. (2016). Foliar application of silicon at different growth stages alters growth and yield of selected wheat cultivars. *Journal of Plant Nutrition*, *39*(8), 1194-1203. https://doi.org/10.1080/01904167.2015.1115876

Miura, K., & Tada, Y. (2014). Regulation of water, salinity, and cold stress responses by salicylic acid. *Frontiers in Plant Science*, *5(4)*, 1-12. https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00004

Naghizadeh, M., & Kabiri, R. (2017). Effect of foliar application of salicylic acid on some

of Physiological characteristics of corn (*Zea mays* L.) under drought stress conditions. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, *9*(4), 317-327. https://doi.org/10.22077/escs.2017.460 [In Persian]

Patane, C., Cosentino, S. L., Romano, D., & Toscano, S. (2022). Relative water content, proline, and antioxidant enzymes in leaves of long shelf-life tomatoes under drought stress and rewatering. *Plants*, *11*(22), 3045. https://doi.org/10.3390/plants11223045

Puppe, D., & Sommer, M. (2018). Experiments, uptake mechanisms, and functioning of silicon foliar fertilization-A review focusing on maize, rice, and wheat. *Advances in Agronomy*, *152*, 1-49. https://doi.org/10.1016/bs.agron.2018.07.003

Qiao, M., Hong, C., Jiao, Y., Hou, S., & Gao, H. (2024). Impacts of drought on photosynthesis in major food crops and the related mechanisms of plant responses to drought. *Plants*, *13*(13), 1808. https://doi.org/10.3390/plants13131808

Raziq, A., Wang, Y., Mohi Ud Din, A., Sun, J., Shu, S., & Guo, S. (2022). A comprehensive evaluation of salt tolerance in tomato (Var. ailsa craig): Responses of physiological and transcriptional changes in RBOH's and ABA biosynthesis and signalling genes. *International Journal of Molecular Sciences*, *23*(3), 1603. https://doi.org/10.3390/ijms23031603

Repke, R. A., Silva, D. M. R., dos Santos, J. C. C., & de Almeida Silva, M. (2022). Alleviation of drought stress in soybean by applying a biostimulant based on amino acids and macro-and micronutrients. *Agronomy*, *12*(10), 2244. https://doi.org/10.3390/agronomy12102244

Renhua, R., Xia, R., Lu, Y., Hu, L., & Xu, Y. (2008) Effect of pre-harvest salicylic acid spray treatment on post-harvest antioxidant in the pulp and peel of '*Cara cara'* navel orange (*Citrus sinenisis* L. Osbeck). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 88, 229-236. https://doi.org/10.1002/jsfa.3076

Rostami Hir, M., Sheikh Zadeh, P., Khomari, S., & Zare, N. (2023) Evaluation of photosynthetic and biochemical characteristics of oilseed rape under drought stress and MoO_3 nanoparticles application. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, *16*(2), 349-367. https://doi.org/10.22077/escs.2022.4611.2047 [In Persian]

Sajed gollojeh, K., Khomari, S., Sheikhzadeh Mosadegh, P., Sabaghnia, N., & mohebodini, M. (2021). The effect of foliar application of nano material and salicylic acid on spring rapeseed yield under water limitation condition. *Journal of Crops Improvement*, *23*(1), 113-126. https://doi.org/10.22059/jci.2020.299040.2358 [In Persian]

Sajed gollojeh, K., Khomari, S., Shekhzadeh, P., Sabaghnia, N., & Mohebodini, M. (2020). The effect of foliar spray of nano silicone and salicylic acid on physiological traits and seed yield of spring rapeseed at water limitation conditions. *Journal of Crop Production*, *12*(4), 137-156. https://doi.org/10.22069/ejcp.2020.16396.2221 [In Persian]

Sapakhova, Z., Irkitbay, A., Madenova, A., & Suleimanova, G. (2022). Mitigation effect of salicylic acid on wheat (*Triticum aestivum* L.) under drought stress. *Research on Crops*, *23*(2), 267-275. https://doi.org/10.31830/2348-7542.2022.037

Sari, D., Ferroudj, A., Dávid, S., El-Ramady, H., Faizy, S. E. D., Ibrahim, S., & Prokisch, J. (2024). Drought stress under a nano-farming approach: A review. *Egyptian Journal of Soil Science*, *64*(1), 135-151. https://doi.org/10.21608/ejss.2023.239634.1668

Sharifa, S., & Muriefah, A. (2015). Effects of paclobutrazol on growth and physiological attributes of Soybean (*Glycine max*) plants grown under water stress conditions. *International Journal of Advanced Research in Biological Sciences*, *2*, 81-93. https://ijarbs.com/pdfcopy/july2015/ijarbs11.pdf

Sharma, M., Gupta, S. K., Majumder, B., Maurya, V. K., Deeba, F., Alam, A., & Pandey, V. (2017). Salicylic acid mediated growth, physiological and proteomic responses in two wheat varieties under drought stress.

Journal of Proteomics, *163*, 28-51. https://doi.org/10.1016/j.jprot.2017.05.011

Sharma, B., Kumawat, K. C., Tiwari, S., Kumar, A., Dar, R. A., Singh, U., & Cardinale, M. (2023). Silicon and plant nutrition-dynamics, mechanisms of transport and role of silicon solubilizer microbiomes in sustainable agriculture: a review. *Pedosphere*, *33*(4), 534-555. https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2022.11.004

Shen, X., Zhou, Y., Duan, L., Li, Z., Eneji, A. E., & Li, J. (2010). Silicon effects on photosynthesis and antioxidant parameters of soybean seedlings under drought and ultraviolet-B radiation. *Journal of Plant Physiology*, *167*(15), 1248-1252. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2010.04.011

Shohani, F., Fazeli, A., & Hosseini, S. (2022). The effects of using salicylic acid and silicon on some physiological and anatomical indices in two ecotypes of *Scrophularia striata* L. medicinal plant under drought stress. *Journal of Plant Biological Sciences*, *14*(2), 21-42. https://doi.org/10.22108/ijpb.2023.137115.1315 [In Persian]

Singh, S., Singh, V. P., Prasad, S. M., Sharma, S., Ramawat, N., Dubey, N. K., & Chauhan, D. K. (2019). Interactive effect of silicon (Si) and salicylic acid (SA) in maize seedlings and their mechanisms of cadmium (Cd) toxicity alleviation. *Journal of Plant Growth Regulation*, *38*, 1587-1597. https://doi.org/10.1007/s00344-019-09958-1

Smith, M. R., Veneklaas, E., Polania, J., Rao, I. M., Beebe, S. E., & Merchant, A. (2019). Field drought conditions impact yield but not nutritional quality of the seed in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Plos One*, *14*(6), e0217099. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217099

Stewart, R. R., & Bewley, J. D. (1980). Lipid peroxidation associated with accelerated aging of soybean axes. *Plant Physiology*, *65*(2), 245-248. https://doi.org/10.1104/pp.65.2.245

Subramani, M., Urrea, C. A., Tamatamu, S. R., Sripathi, V. R., Williams, K., Chintapenta, L. K., & Ozbay, G. (2024). Comprehensive proteomic analysis of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seeds reveal shared and unique proteins involved in terminal drought stress response in tolerant and sensitive genotypes. *Biomolecules*, *14*(1), 109-126. https://doi.org/10.3390/biom14010109

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), 1014. https://doi.org/10.1038/s41598-020-79723-y

Teimoori, N., Ghobadi, M., & Kahrizi, D. (2024) Reduction of oxidative damage caused by drought stress in *Camelina* (*Camelina sativa* L.) seedlings using silicone. *Iranian Journal of Seed Science and Technology*, *13*(3), 53-70. https://doi.org/10.22092/ijsst.2023.362510.1488 [In Persian]

Tripathi, D. K., Singh, V. P., Prasad, S. M., Chauhan, D. K., Dubey, N. K., & Rai, A. K. (2015) Silicon-mediated alleviation of Cr (VI) toxicity in wheat seedlings as evidenced by chlorophyll florescence, laser induced breakdown spectroscopy and anatomical changes. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *113*, 133–144. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.09.029

Ullah, A., Sun, H., Hakim, Yang, X., & Zhang, X. (2018). A novel cotton WRKY gene, GhWRKY6- like, improves salt tolerance by activating the ABA signaling pathway and scavenging of reactive oxygen species. *Physiologia Plantarum*, *162*(4), 439-454. https://doi.org/10.1111/ppl.12651

Vaisnad, S., & Talebi, R. (2015). Salicylic acid-enhanced morphological and physiological responses in chickpea (*Cicer arietinum*) under water deficit stress. *Environmental and Experimental Biology*, *13*(3), 109-115. https://eeb.lu.lv/EEB/201510/EEB_13_Vaisnad.pdf

Vicente-Serrano, S. M., Peña-Angulo, D., Beguería, S., Domínguez-Castro, F., Tomás-Burguera, M., Noguera, I., & El Kenawy, A. (2022). Global drought trends and future projections. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, *380*(2238), 20210285. https://doi.org/10.1098/rsta.2021.0285

Yan, G., Jin, H., Yin, C., Hua, Y., Huang, Q., Zhou, G., & Zhu, Z. (2023). Comparative effects of

silicon and silicon nanoparticles on the antioxidant system and cadmium uptake in tomato under cadmium stress. *Science of The Total Environment*, *904*, 166819. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166819

Yekti, R., Bukhari, A., Jafar, N., & Thaha, A. R. (2018). Measurement of malondialdehyde (MDA) as a good indicator of lipid peroxidation. *International Journal of Allied Medical Sciences and Clinical Research* (IJAMSCR), *6*(4), 1-3. https://doi.org/10.61096/ijamscr.v6.iss4.2018.838-840