Plant Prod., 2026, 49(3), 391- 410
https://plantproduction.scu.ac.ir/
ISSN (P): 2588-543X; **ISSN (E):** 2588-5979
Doi: 10.22055/ppd.2025.50324.2286
Received: 12 August 2025
Accepted: 02 December 2025

Plant Productions

Research Article

Phytochemical response of olive (*Olea europaea* cv. Zard) to foliar application of nano-silicon and sodium nitroprusside under salt stress conditions

Naghmeh Pouri[1], Esmaeil Seifi[1*], Mahdi Alizadeh[1]

1. Department of Horticultural Sciences, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

Citation: Pouri, N., Seifi, E., & Alizadeh, M. (2026). Phytochemical response of olive (*Olea europaea* cv. Zard) to foliar application of nano-silicon and sodium nitroprusside under salt stress conditions. *Plant Productions*, 49(3), 391- 410.

Abstract

Introduction

In recent years, salinity has become one of the most important limiting factors for plants growth, causing a decrease in the yield of horticultural crops. Sodium nitroprusside (SNP), a membrane-permeable free radical and a broad intra- and extracellular messenger, mitigates stresses- especially salt stress- by modulating signaling pathways. Additionally, certain nutrients, such as silicon, can enhance plant growth under salt stress conditions by increasing antioxidant activities and reducing sodium uptake.

Materials and Methods

This study was conducted on one-year-old cuttings of the olive cv. “Zard” in the greenhouse of Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources in 2022. In order to induce salinity stress, sodium chloride (NaCl) was applied at four concentrations of 0, 50, 100, and 150 mM through irrigation with urban water for 90 days. Irrigation intervals with saline water were considered to be 4 days. Foliar application of elicitors including nano-silicon (at concentrations of 100 and 200 mg. l^{-1}) and sodium nitroprusside (at concentrations of 0.5 and 1 mM) alongside a control, was carried out in four times at 20-day intervals. The measured characteristics included chlorophyll and carotenoid pigments, total soluble sugars, total phenols, antioxidant capacity, and sodium (Na), potassium (K), and calcium (Ca) elements in leaves and roots.

Results and Discussion

The results showed that the interaction effect of salinity and elicitor on carotenoid and antioxidant was significant. The content of carotenoid decreased with increasing salinity, while foliar application of elicitors (especially nano-silicon) increased it. The application of elicitors at certain concentrations led to a slight reduction in the antioxidant percentage. However, in most treatments, no significant change was observed compared to the control elicitor. The independent effects of salinity on the contents of chlorophyll a, b, total chlorophyll and total soluble sugars were significant and decreased with increasing salinity. Salinity also significantly increased total

* **Corresponding Author:** Esmaeil Seifi
E-mail: esmaeilseifi@gau.ac.ir

© 2026 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

phenolic content. Foliar application of elicitors enhanced the contents of chlorophyll a, and total chlorophyll and total phenols. On the other hand, the interaction effects of salinity and elicitor significantly impacted Na and K concentrations in roots, root K/Na ratio, and Ca concentration in leaves and roots. Under salinity stress, the concentration of root Na increased slightly. Foliar application of elicitors, especially at the highest level of salinity, further elevated root Na concentration. Higher salinity reduced root K concentration and root K/Na ratio, but the use of elicitors, especially nano-silicon (at 200 mg. l^{-1}), improved both characteristics under salinity conditions. The independent effect of salinity significantly increased leaf Na concentration, while foliar application of elicitors reduced this element. Furthermore, salinity independently led to a significat reduction in leaf K concentration and leaf K/Na ratio.

Conclusion

Salinity stress, particularly at the highest salt concentration (150 mM), severely damaged one-year-old cuttings of olive cv. Zard. Application of nano-silicon and SNP mitigated the oxidative stress and, as a result, enhanced plant tolerance to salinity by modulating antioxidant activity and increasing the content of chlorophyll and carotenoid pigments.

Keywords: Antioxidant capacity, Nitric oxide, Nutrient elements, Silicon, Sodium chloride

تولیدات گیاهی، ۱٤۰۵، ٤۹(۳)، ۳۹۱-٤۱۰
https://plantproduction.scu.ac.ir/
ISSN (P): 2588-543X; **ISSN (E):** 2588-5979
Doi: 10.22055/ppd.2025.50324.2286
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۱

تولیدات گیاهی
مقاله پژوهشی

واکنش فیتوشیمیایی زیتون (*Olea europaea* cv. Zard) به محلول‌پاشی نانوسیلیکون و نیتروپروساید سدیم در شرایط تنش شوری

نغمه پوری[۱]، اسماعیل سیفی[۱*]، مهدی علیزاده[۱]

۱- گروه علوم و مهندسی باغبانی، دانشکده تولیدات گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

چکیده

در سال‌های اخیر، شوری به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکنندهٔ رشد گیاهان باعث کاهش عملکرد محصولات باغی شده است. نیتروپروساید سدیم، یک رادیکال آزاد قابل نفوذ در غشا و پیام‌رسان گستردهٔ درون و برون سلولی است که با تأثیرگذاری بر مسیرهای سیگنالی در تعدیل تنش‌ها به‌ویژه تنش شوری نقش دارد. علاوه بر این، برخی عناصر غذایی از جمله سیلیسیم می‌توانند با افزایش فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی و کاهش جذب سدیم باعث بهبود رشد گیاهان در شرایط تنش شوری شوند. این پژوهش بر روی قلمه‌های یک‌سالهٔ زیتون رقم زرد در گلخانهٔ دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان در سال ۱٤۰۱ انجام شد. به‌منظور القای تنش شوری، تیمار کلرید سدیم در چهار غلظت ۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار همراه آبیاری با آب شهری به مدت ۹۰ روز اعمال شد. فواصل آبیاری با آب شور ٤ روز در نظر گرفته شد. محلول‌پاشی القاگرها شامل نانوسیلیکون (در غلظت‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر) و نیتروپروساید سدیم (در غلظت‌های ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار) در کنار شاهد طی چهار نوبت به فواصل ۲۰ روز انجام شد. صفات مورد اندازه‌گیری شامل رنگیزه‌های کلروفیل و کاروتنوئید، قند محلول کل، فنل کل، ظرفیت آنتی‌اکسیدان، و عناصر سدیم، پتاسیم و کلسیم برگ و ریشه بودند. نتایج نشان داد که برهم‌کنش شوری و القاگر بر صفات کاروتنوئید و آنتی‌اکسیدان معنی‌دار بود. با افزایش شوری محتوای کاروتنوئید کاهش یافت و محلول‌پاشی القاگرها به‌ویژه نانوسیلیکون باعث افزایش آن شد. کاربرد القاگرها در برخی غلظت‌ها به کاهش جزئی درصد آنتی‌اکسیدان منجر شد. با این حال، در اکثر تیمارها تغییر معنی‌داری نسبت به القاگر شاهد مشاهده نشد. اثر مستقل شوری بر محتوای کلروفیل a، b و کل و قند محلول کل معنی‌دار بود و با افزایش شوری کاهش یافت. همچنین شوری به‌طور معنی‌داری محتوای فنل کل را افزایش داد. محلول‌پاشی القاگرها در افزایش محتوای کلروفیل a و کل و فنل کل مؤثر بود. از سوی دیگر، برهم‌کنش شوری و القاگر بر غلظت عناصر سدیم و پتاسیم ریشه، نسبت پتاسیم به سدیم ریشه، کلسیم برگ و کلسیم ریشه معنی‌دار بود. در شرایط تنش شوری غلظت سدیم ریشه تاحدودی افزایش یافت. محلول‌پاشی القاگرها به‌ویژه در بالاترین سطح شوری باعث افزایش بیشتر غلظت سدیم ریشه شد. افزایش سطح شوری منجر به کاهش غلظت پتاسیم ریشه و نیز کاهش نسبت پتاسیم به سدیم ریشه شد و مصرف القاگرها به‌ویژه نانوسیلیکون ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر مقدار این دو صفت را در بالاترین سطح شوری بهبود

نویسنده مسئول: اسماعیل سیفی
رایانامه: esmaeilseifi@gau.ac.ir

بخشید. اثر مستقل شوری باعث افزایش غلظت سدیم برگ شد، درحالی‌که محلول‌پاشی القاگرها محتوای این عنصر را کاهش داد. همچنین اثر مستقل شوری به کاهش معنی‌دار غلظت پتاسیم برگ و نسبت پتاسیم به سدیم برگ منجر شد. تنش شوری به‌ویژه در بالاترین سطح شوری بر نهال‌های یک‌سالهٔ زیتون رقم زرد تأثیر منفی داشت. محلول‌پاشی نیتروپروساید سدیم و نانوسیلیکون باعث کاهش تنش اکسیداتیو شده و در نتیجه از طریق تعدیل فعالیت آنتی‌اکسیدان و افزایش محتوای رنگیزه‌های کلروفیل و کاروتنوئید باعث افزایش تحمل گیاه در برابر تنش شوری گردید.

کلیدواژه‌ها: اکسید نیتریک، سیلیسیم، ظرفیت آنتی‌اکسیدان، عناصر غذایی، کلرید سدیم

مقدمه

از میان تنش‌های غیرزیستی، شوری مهم‌ترین عامل محدودکنندهٔ رشد گیاه است (Vinocur and Altman, 2005; Munns and Tester, 2008). پاسخ گیاهان به شوری چندوجهی است و شامل تغییرات در ریخت‌شناسی، فیزیولوژی و سوخت‌وساز گیاه می‌باشد (Hilal *et al.*, 1998). اولین پاسخ به تنش شوری کاهش سرعت توسعهٔ سطح برگ و به دنبال آن کاهش فتوسنتز است (Heuer, 2005). تنش شوری از چند مسیر سرعت فتوسنتز را کاهش می‌دهد، از جمله کاهش تأمین دی‌اکسید کربن به دلیل بسته شدن روزنه‌ها، بروز سمیت یونی، کاهش نفوذپذیری غشای سلولی نسبت به دی‌اکسید کربن، تشدید پیری و ایجاد تغییر در فعالیت آنزیم‌ها (Kafi and Rahimi, 2011). قابلیت دسترسی مواد غذایی در خاک در شرایط تنش شوری، به علت کاهش انحلال، پایین می‌آید. رسوب نمک، فرآیندهای فیزیولوژیک را تغییر می‌دهد، به عنوان مثال جذب مواد غذایی کاهش می‌یابد (Garg, 2003). کاهش جذب مواد غذایی در شرایط تنش، به علت کاهش سرعت تعرق رخ می‌دهد (Ali *et al.*, 2008).

زیتون به‌طور نسبی در برابر تنش شوری متحمل است و اختلافات وسیعی در تحمل به شوری ژنوتیپ‌های آن وجود دارد (Gucci and tattini, 1997). زیتون با تحمل شوری خاک در محدودهٔ ۱۳- ۸ دسی‌زیمنس بر متر، گیاهی با تحمل متوسط نسبت به شوری است (Alaei and Tafazzoli, 2009). یکی از اثرهای مخرب تنش شوری بر رشد گیاهان، تجمع سدیم در برگ‌هاست (Ashraf, 2004). تاتینی (Tattini, 1994) بیان کرد که سازوکار تحمل شوری در زیتون، احتمالاً به دفع سدیم توسط ریشه و توانایی حفظ نسبت مناسب پتاسیم به سدیم در بافت‌های در حال رشد فعال مربوط می‌شود. سازوکار دفع در سطوح پایین و متوسط شوری (حدود ۵۰ میلی‌مولار) عمل می‌کند. در شوری بالا، سدیم منتقل می‌شود و در بخش‌های هوایی تجمع می‌یابد که به علائم سمیت منجر می‌شود (Chartzoulakis *et al.*, 2002). ارقام متحمل بیشتر از ارقام حساس قادرند یون‌های سمی را دفع کنند و در نتیجه، غلظت یون‌های سمی در برگ‌ها در ارقام متحمل کمتر از ارقام حساس می‌باشد (Gucci and Tattini, 1997).

در بسیاری از پژوهش‌ها، استفاده از عناصر غذایی به عنوان روشی مؤثر برای کاهش اثرهای منفی تنش شوری بر رشد و عملکرد گیاهان مطرح است. یکی از این عناصر، سیلیسیم است که پس از اکسیژن، دومین عنصر فراوان در پوستهٔ زمین است (Epstein, 1994) و یکی از اجزای اصلی ساختار دیوارهٔ سلولی در برخی گونه‌های تک‌لپه به شمار می‌رود (Inanaga and Okasaka, 1996). سیلیکون، اثر تنش‌های غیرزیستی از جمله تنش شوری، خشکی، سمیت فلزات سنگین، عدم تعادل عناصر غذایی، دمای بالا و انجماد را کاهش می‌دهد (Ma and Takahashi, 2002; Hamdi Shengri *et al.*, 2025). کاربرد سیلیکون خارجی اثرهای مخرب شوری بر رشد را از طریق کاهش محتوای Na^+ بافت و حفظ یکپارچگی غشا بهبود می‌بخشد و ظرفیت مهار گونه‌های اکسیژن واکنش‌گر را افزایش می‌دهد (Hashemi *et al.*, 2010). همچنین سیلیکون با

بهبود وضعیت آبی گیاه، تغییر در ساختار اندامک‌های برگ، فعال‌سازی سیستم‌های دفاعی گیاه و کاهش جذب یون‌های مضر، عملکرد گیاه را در شرایط تنش شوری بهبود می‌بخشد (Parveen and Ashraf, 2010). در مطالعه‌ای دیگر، گزارش شده است که کاربرد خارجی سیلیکون باعث تجمع بالای پرولین در ژنوتیپ‌های حساس به شوری می‌شود (Abbas *et al*., 2015). این امر ممکن است به علت تنظیم بالای فعالیت دلتا-پیرولین-۵-کربوکسیلات سنتتاز (آنزیم کلیدی در بیوسنتز پرولین) و کاهش تنظیم پرولین‌دهیدروژناز در پی کاربرد سیلیکون باشد (Zhu *et al*., 2020). توانایی سیلیکون در بهبود اثر منفی کلرید سدیم بر سرعت رشد گیاهان به خوبی اثبات شده است (Kafi and Rahimi, 2011). با این حال، دربارهٔ اثرهای سیلیکون بر زیتون اطلاعات اندکی وجود دارد (Ghorbani *et al*., 2023).

در شرایط تنش، برای بقا و ادامهٔ رشد گیاه، سطوح بسیار بالای گونه‌های اکسیژن واکنش‌گر باید با پاسخ‌های گوناگون سلولی سم‌زدایی شود (Gratäo *et al*., 2005). اکسید نیتریک یک گونهٔ نیتروژن به شدت فعال، گازی‌شکل و ردوکس است که در سلول‌های زنده در شرایط عادی و شرایط تنش زیستی و غیرزیستی تولید می‌شود. هنگامی که غلظت گونه‌های اکسیژن واکنش‌گر برای یک گیاه سمی می‌شود، اکسید نیتریک ممکن است به عنوان سم‌زدا عمل کند و هرگونه اثرهای مخرب را به حداقل برساند (Lipton *et al*., 1993). در گیاهان اکسید نیتریک از NO_2 توسط نیترات ردوکتاز تولید می‌شود (Kaiser, *et al*., 2002). اکسید نیتریک یک رادیکال آزاد کوچک، بسیار فعال، قابل انتشار و نفوذپذیر در غشا است که به تازگی به عنوان یک مولکول سیگنال‌دهی مطرح شده است (Fan *et al*., 2013). اثر مثبت اکسید نیتریک در شرایط تنش، احتمالاً به واکنش آن با رادیکال‌های آزاد برمی‌گردد، زیرا گونه‌های اکسیژن واکنش‌گر، اصلی‌ترین عاملی هستند که در شرایط تنش باعث خسارت و شکستن رنگیزه‌های فتوسنتزی و پروتئین‌های ساختاری دستگاه فتوسنتز می‌شوند (Kim and Lee, 2005). اثر اکسید نیتریک بر رشد و نمو گیاه بستگی به غلظت نمک، حساسیت گونهٔ گیاهی و ترکیب ژنتیکی آن در مقاومت و مقابله با اثرهای نامطلوب تنش شوری دارد (Siddiqui *et al*., 2017). نیتروپروساید سدیم (SNP)[1] به عنوان آزادکنندهٔ اکسید نیتریک در غلظت ۱۰۰ میکرومولار، با تنظیم محتوای پلی‌آمین آزاد تحمل به شوری دانهال‌های خیار را در تیمار تنش ۵۰ میلی‌مولار کلرید سدیم افزایش داد (Fan *et al*., 2013). همچنین در مطالعه‌ای بر روی زیتون کنسروالیا، محلول‌پاشی SNP در غلظت‌های ۰، ۰/۱، ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار انجام شد. ۳۰ روز پس از اعمال تیمارها SNP به‌ویژه در غلظت ۱ میلی‌مولار، منجر به افزایش محتوای رطوبت نسبی برگ، محتوای پرولین، و آنزیم‌های پراکسیداز و پلی‌فنل‌اکسیداز گردید (Elhami *et al*.,2015). با این حال، تاکنون گزارشی دربارهٔ اثربخشی اکسید نیتریک بر زیتون در شرایط تنش شوری منتشر نشده است. بنابراین، هدف از این پژوهش بررسی نقش نانوسیلیکون و نیتروپروساید سدیم در کاهش اثرهای منفی تنش شوری بر نهال‌های یک‌سالهٔ زیتون رقم حساس زرد می‌باشد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در دو بخش گلخانه‌ای و آزمایشگاهی در سال ۱۴۰۱ در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان به اجرا در آمد. آزمایش بر روی قلمه‌های ریشه‌دار شدهٔ یک‌سالهٔ زیتون رقم زرد، به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار در محیط کشت لوم شنی (مخلوطی از خاک معمولی، خاک‌برگ و ماسه به نسبت ۱:۱:۲) به اجرا در آمد که هر تکرار حاوی سه گلدان بود. فاکتورهای آزمایش شامل تنش شوری در چهار سطح (غلظت‌های ۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار نمک کلرید سدیم) و القاگر در پنج سطح (غلظت‌های ۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون (سیگما آلمان) و ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار نیتروپروساید سدیم (سیگما آلمان) بودند.

1- Sodium Nitroprusside

بخش گلخانه‌ای از فروردین تا تیرماه به مدت ۹۰ روز انجام شد. گیاهان ابتدا به گلدان‌های بزرگ‌تر منتقل شده و به صورت یکنواخت هرس شدند. نهال‌ها به مدت یک هفته با آب شهری آبیاری شدند تا به شرایط جدید سازگار شوند. خصوصیات آب شهری گرگان عبارتند از: هدایت الکتریکی ۰/۵۹۷، اسیدیته ۷/۲، کلسیم ۱۰۳ میلی‌گرم بر لیتر، سدیم ۵۲ میلی‌گرم بر لیتر و پتاسیم ۴ میلی‌گرم بر لیتر. سپس به‌منظور ایجاد تنش، آبیاری با آب شهری حاوی غلظت‌های ۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار نمک کلرید سدیم (معادل هدایت الکتریکی به‌ترتیب ۰/۵۹۷، ۵/۶۹، ۱۰/۸۵ و ۱۵/۴۵ دسی‌زیمنس بر متر) آغاز گردید (Poury *et al.*, 2023). گلدان‌ها هر چهار روز یک بار به میزان ۲۰۰ میلی‌لیتر آبیاری شدند. به‌منظور تعیین مقدار آب مورد نیاز برای آبیاری ظرفیت زراعی اندازه‌گیری شد؛ بدین ترتیب که ابتدا یکی از گلدان‌ها در حد اشباع آبیاری و مقدار آب مصرفی یادداشت شد. پس از ۲۴ ساعت آب خارج شده از زهکش گلدان نیز اندازه‌گیری و اختلاف آن‌ها به عنوان مقدار آب مورد نیاز برای آبیاری در نظر گرفته شد. گلدان‌ها هر ۲۴ روز یک بار با آب معمولی به میزان ۲۰۰ میلی‌لیتر آبشوئی شدند تا از تجمع نمک در خاک جلوگیری شود. محلول‌پاشی القاگرها روزهای ۲۰، ۴۰، ۶۰، و ۸۰ انجام شد تا اثر آن بر بهبود عملکرد گیاهان در برابر تنش اعمال شده مورد بررسی قرار گیرد. در انتها برگ‌ها مورد ارزیابی آزمایشات شیمیایی قرار گرفتند.

به‌منظور اندازه‌گیری غلظت کلروفیل a، b و کل و همچنین کاروتنوئید، ۰/۵ گرم بافت برگی تازه، خرد شده و ۱۰ میلی‌لیتر دی متیل سولفواکسید (DMSO)[1] خالص به آن اضافه گردید. پس از استخراج رنگیزه‌ها، ۰/۵ میلی‌لیتر از محلول حاصل با DMSO به حجم ۲/۵ میلی‌لیتر رسانده شد و سپس میزان جذب محلول به‌دست آمده با استفاده از اسپکتروفتومتر در طول موج‌های ۶۶۳ و ۶۴۵ نانومتر برای کلروفیل و ۴۸۰ و ۵۱۰ نانومتر برای کاروتنوئید قرائت شد. در انتها میزان رنگیزه‌ها از طریق رابطه‌های (۱) الی (۴) برحسب میلی‌گرم بر گرم وزن تازه محاسبه شد (Barnes *et al.*, 1992).

$$\text{Chlorophyll a} = \frac{(12.7\times O.D_{663})-(2.69\times O.D_{645})\times \text{Volume}\times \text{Dilution Rate}}{1000\times \text{Sample weight}} \quad \text{(رابطهٔ ۱)}$$

$$\text{Chlorophyll b} = \frac{(22.7\times O.D_{645})-(4.68\times O.D_{663})\times \text{Volume}\times \text{Dilution Rate}}{1000\times \text{Sample weight}} \quad \text{(رابطهٔ ۲)}$$

$$\text{Total Chlorophyll} = \frac{(20.2\times O.D_{645})+(8.02\times O.D_{663})\times \text{Volume}\times \text{Dilution Rate}}{1000\times \text{Sample weight}} \quad \text{(رابطهٔ ۳)}$$

به‌منظور اندازه‌گیری غلظت قند محلول کل، ۰/۱ گرم نمونه برگ خشک پودر شده با ۵ میلی‌لیتر اسیدکلریدریک ۲/۵ نرمال به مدت سه ساعت در حمام آب گرم هیدرولیز شد. در مرحلهٔ بعد حجم نمونه‌ها با آب مقطر به ۱۰۰ میلی لیتر رسانده شد. سپس ۴ میلی‌لیتر معرف آنترون به نمونه‌ها اضافه شده و به مدت ۸ دقیقه در حمام آب گرم با دمای ۱۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد قرار گرفت تا نمونه‌ها به رنگ سبز تیره درآیند. در نهایت جذب محلول حاصل در طول موج ۶۳۰ نانومتر قرائت و محتوای قند محلول محاسبه گردید (McCready *et al.*, 1950).

برای اندازه‌گیری محتوای فنل کل برگ، مقدار ۰/۲ گرم برگ خشک پودر شده به همراه ۲ میلی‌لیتر متانول ۸۰ درصد به مدت ۲۴ ساعت روی شیکر قرار گرفت. به ۲۰ میکرولیتر از عصاره‌ی حاصل، ۱/۱۶ میلی‌لیتر آب مقطر و ۱۰۰ میکرولیتر معرف فولین اضافه شد. پس از ۵ دقیقه، ۳۰۰ میکرولیتر محلول کربنات سدیم ۲۰ درصد به لوله‌ها اضافه گردید و به مدت ۳۰ دقیقه در حمام آب گرم قرار داده شد. در نهایت جذب نمونه‌ها در طول موج ۷۶۰ نانومتر قرائت و محتوای فنل محاسبه گردید (Slinkard and Singleton, 1997).

1- Dimethyl Sulfoxide

$$\text{Total Carotenoids} = \frac{(7.6\times O.D_{480})-(1.49\times O.D_{510})\times \text{Volume}\times \text{Dilution Rate}}{1000\times \text{Sample weight}} \quad \text{(رابطهٔ ۴)}$$

ارزیابی فعالیت آنتی‌اکسیدانی به روش قدرت مهارکنندگی رادیکال‌های آزاد دی فنیل ۱- پیکریل هیدرازیل (DPPH)[۱] انجام شد (Blois, 1958). یک میلی‌لیتر از عصارهٔ متانولی برگ خشک با یک میلی‌لیتر محلول متانولی DPPH ۰/۱ میلی‌مولار مخلوط شده و به مدت ۳۰ دقیقه در دمای اتاق در تاریکی نگهداری شد. سپس جذب آن‌ها در طول موج ۵۱۷ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر خوانده شد. در نهایت میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی برحسب درصد مهار نسبی DPPH طبق رابطهٔ (۵) محاسبه گردید.

به‌منظور تهیهٔ عصارهٔ بافت گیاهی جهت اندازه‌گیری غلظت سدیم و پتاسیم برگ، ابتدا مقدار ۰/۵ گرم از برگ خشک پودر شده به مدت ۴ ساعت در کوره‌ی الکتریکی با دمای ۵۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد قرار گرفت تا به خاکستر تبدیل شود. سپس مقداری آب مقطر و ۲/۵ میلی‌لیتر اسیدکلریدریک ۲ نرمال اضافه شد. نمونه‌ها به مدت نیم ساعت در حمام آب گرم با دمای ۱۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد قرار داده شد. در نهایت نمونه‌ها با استفاده از کاغذ صافی واتمن صاف و با آب مقطر به حجم ۲۵ میلی‌لیتر رسانده شد. برای اندازه‌گیری غلظت عناصر سدیم و پتاسیم، میزان جذب عصاره‌ها با استفاده از دستگاه فلیم فتومتر قرائت و در نهایت برحسب میلی‌گرم بر لیتر گزارش شد (Qadar, 1995).

به‌منظور اندازه‌گیری غلظت کلسیم، ۵ میلی‌لیتر از عصارهٔ تهیه شده و اندکی پودر مورکسید به همراه ۵ قطره محلول سود ۴ نرمال به نمونه‌ها اضافه شد. سپس عمل تیتراسیون تا زمان تبدیل رنگ صورتی به ارغوانی انجام شد. در نهایت با استفاده از رابطهٔ (۶) غلظت کلسیم برگ برحسب میلی‌گرم بر لیتر محاسبه گردید (Freeman and Edelman, 1959).

$$\text{Percentage of DPPH Inhibition} = \frac{\text{Control Absorption} - \text{Sample Absorption}}{\text{Control Absorption}} \times 100 \quad \text{(رابطهٔ ۵)}$$

$$\text{Calcium concentration} = \frac{\text{consumed Volume of versin} \times \text{normality of versin} \times \text{atomic number of calcium} \times 1000}{\text{Extract volume}} \quad \text{(رابطهٔ ۶)}$$

داده‌ها به‌وسیلهٔ نرم‌افزار Infostat تجزیه و تحلیل شده و مقایسه میانگین‌ها بر اساس آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) انجام شد.

نتایج و بحث

صفات فیتوشیمیایی

بر اساس نتایج تجزیه واریانس مشخص شد که برهم‌کنش شوری و القاگر بر محتوای کاروتنوئید و ظرفیت آنتی‌اکسیدان در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. اثر مستقل شوری بر محتوای رنگیزه‌های کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل و فنل کل در سطح احتمال یک در صد و بر محتوای قند محلول کل در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود. همچنین اثر مستقل القاگر بر محتوای فنل کل در سطح احتمال یک درصد و بر صفات کلروفیل a و کلروفیل کل در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۱).

تنش شوری باعث کاهش محتوای کاروتنوئید شد و با محلول‌پاشی القاگرها به‌ویژه نانوسیلیکون، مقدار آن افزایش یافت. بیشترین مقدار (۰/۴۴ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) در تیمار شوری شاهد – ۰/۵ SNP میلی‌مولار مشاهده شد که با تیمار کلرید سدیم ۵۰ میلی‌مولار – نانوسیلیکون ۲۰۰ میلی‌گرم تفاوت معنی‌داری نداشت. کمترین مقدار (۰/۲۵ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) نیز مربوط به تیمارهای کلرید سدیم ۱۰۰ میلی‌مولار – نانوسیلیکون ۱۰۰ میلی‌گرم و شوری ۱۵۰ میلی‌مولار – القاگر شاهد بود که با تیمارهای شوری ۱۰۰ میلی‌مولار – القاگر شاهد، و شوری ۱۵۰ میلی‌مولار – ۱ SNP میلی‌مولار تفاوت معنی‌داری نداشت (شکل ۱).

۱ 2,2-Diphenyl-1-Picrylhydrazyl

کاروتنوئیدها یکی از رنگیزه‌های فتوسنتزی هستند که مقدار آن در واکنش به تنش شوری به شدت کاهش می‌یابد. کاروتنوئیدها از جمله آنتی‌اکسیدان‌های غیرآنزیمی به شمار می‌روند که در پاک‌سازی گونه‌های اکسیژن واکنش‌گر که در اثر تنش شوری ایجاد شده‌اند، نقش مهمی دارند (Parida and Das, 2005). این رنگیزه نقش حفاظتی در مقابل تنش اکسیداتیو القا شده دارد. همچنین در سمیت‌زدایی از کلروفیل مؤثر بوده و باعث کاهش اثرهای سمی رادیکال‌های آزاد می‌شود (Sanitata & Gabriella, 1999). نتایج این آزمایش با گزارش‌های دیگر هم‌خوانی دارد. قربانی و همکاران (Ghorbani *et al*., 2023) در مطالعه بر روی پنج رقم زیتون شامل کنسروالیا، کرونیکی، دیره، کلاه فرج و شیراز بیان کردند که کمترین مقدار کاروتنوئید برگ زیتون در سطح شوری ۱۵۰ میلی‌مولار مشاهده شد و کاربرد نانوذرات سیلیکون اثرهای ناشی از تنش شوری را بر این رنگیزه تا حدی بهبود بخشید. در آزمایشی دیگر که بر روی سویا انجام شد، محتوای کاروتنوئید در شرایط تنش شوری کاهش یافت و استفاده از نیتروپروساید سدیم اثر منفی شوری را بر این رنگیزه خنثی نمود (Simaei *et al*., 2011). همچنین در انگور کاربرد SNP باعث افزایش محتوای کاروتنوئید در همهٔ سطوح شوری شد (Ebrahimi *et al*., 2019).

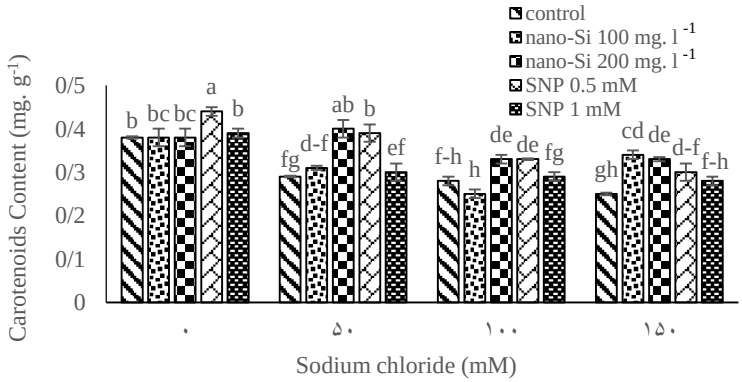
جدول ۱- تجزیه واریانس برخی صفات فیتوشیمیایی زیتون رقم زرد در واکنش به تنش شوری و محلول‌پاشی القاگر

Table 1. Analysis of variance for some phytochemical characteristics of olive cv. Zard affected by salinity stress and elicitor foliar application

S.O.V	Df	Mean of squares						
		Chlorophyll a content	Chlorophyll b content	Total chlorophyll content	Carotenoid content	Total soluble sugars content	Total phenols content	Antioxidant capacity
Salinity	3	0.09 **	0.01 **	0.15 **	0.03 **	38754.37 *	96400.21 **	34.03 **
Elicitor	4	0.02 *	0.001 ns	0.03 *	0.01 **	25154.68 ns	22199.64 **	60.1 **
Salinity×Elicitor	12	0.01 ns	0.0007 ns	0.01 ns	0.0029 **	11634.6 ns	4428.56 ns	16.02 **
Error	40	0.01	0.00076	0.01	0.00047	11038.36	2802.47	4.57
C.V (%)		16.93	19.65	16.78	6.54	17.98	15.81	3.11

** و * اختلافات معنی‌دار را به ترتیب در سطوح احتمال یک و پنج درصد نشان می‌دهند و ns به معنی عدم وجود تفاوت معنی‌دار می‌باشد.

** and * indicate significant differences at 1% and 5% probability levels, respectively, and ns means no significant difference



شکل ۱- برهم‌کنش شوری و القاگر بر محتوای کاروتنوئید زیتون رقم زرد

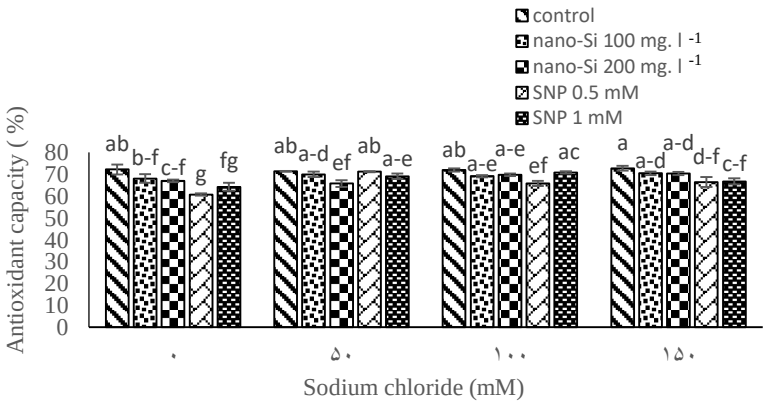
Figure 1. Interaction effect of salinity and elicitor on carotenoid content of olive cv. Zard

برهم‌کنش شوری و القاگر بر ظرفیت آنتی‌اکسیدان معنی‌دار بود ($P<$۰/۰۱). بیشترین مقدار (۷۲/۷۷ درصد) مربوط به تیمار شوری ۱۵۰ میلی‌مولار – القاگر شاهد بود که با بسیاری از تیمارهای دیگر تفاوت معنی‌داری نداشت. کمترین مقدار (۶۰/۷۴ درصد) نیز در تیمار شوری شاهد – ۰/۵ SNP میلی‌مولار مشاهده شد که با تیمار شوری شاهد – ۱ SNP

میلی‌مولار تفاوت معنی‌داری نداشت (شکل ۲). با افزایش شوری در تیمار القاگر شاهد ظرفیت آنتی‌اکسیدان تغییر معنی‌داری نداشت و در اثر محلول‌پاشی القاگرها درصد آنتی‌اکسیدان کل به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. بررسی نتایج در هر سطح شوری به‌طور مجزا، نشان داد که القاگرهای مورد استفاده به‌ویژه SNP باعث کاهش جزئی درصد آنتی‌اکسیدان نسبت به القاگر شاهد شدند. نانوسیلیکون نیز صرفاً در غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم و در سطح شوری ۰ و ۵۰ میلی‌مولار باعث کاهش جزئی درصد آنتی‌اکسیدان کل نسبت به القاگر شاهد شد و در سایر تیمارها تغییر معنی‌داری نداشت.

تنش موجب تجمع گونه‌های اکسیژن واکنش گر در گیاهان شده و باعث صدمات اکسیداتیو به چربی و پروتئین‌ها و در نهایت مرگ گیاه می‌شود (Molassiotis *et al.*, 2006). گیاهان برای مقابله با کاهش یا ممانعت از اثرات مخرب گونه‌های اکسیژن واکنش گر، سازوکار آنتی‌اکسیدانی را فعال می‌کنند و درصد فعالیت آنتی‌اکسیدانی در شرایط تنش افزایش می‌یابد (Daryabeigi *et al.*, 2023). سیلیکون می‌تواند فعالیت آنتی‌اکسیدانی گیاهان را افزایش دهد و در نتیجه خسارت گونه‌های اکسیژن واکنش گر ناشی از تنش‌هایی مانند شوری را کاهش دهد (Qian *et al.*, 2006). نیتروپروساید سدیم نیز به عنوان یک مولکول سیگنال‌دهی سیستم آنتی‌اکسیدان سلول را فعال می‌کند و به‌طور مستقیم اکسیژن واکنش گر را به پروکسی نیتریت تبدیل کرده و از سمیت آن به مراتب می‌کاهد، در نتیجه آسیب سلولی را محدود می‌کند (Martinez *et al.*, 2000).

در این پژوهش، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی که برآیند مجموعه‌ای از آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی و غیرآنزیمی است، کاهش یافت. این کاهش جزئی می‌تواند ناشی از کاهش در برخی آنتی‌اکسیدان‌های دیگر باشد که مورد اندازه‌گیری قرار نگرفته‌اند؛ چرا که همان‌طور که در این مطالعه آمده است، القاگرها باعث افزایش آنتی‌اکسیدان‌های غیرآنزیمی از جمله کاروتنوئید و فنل کل شدند. به عبارتی القاگرها تأثیر مثبتی در کاهش تنش اکسیداتیو داشته و با گذر زمان گیاه نیازی به صرف انرژی برای فعال کردن سایر آنتی‌اکسیدان‌ها نداشته است. ویسی و همکاران (Veisi *et al.*, 2022) نیز در آزمایشی مشابه دریافتند که محلول‌پاشی نانوسیلیکون باعث کاهش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی نسبت به القاگر شاهد شد که با نتایج حاصل از این پژوهش مطابقت دارد. با این حال، در برخی دیگر از پژوهش‌ها گزارش شده است که غلظت‌های مختلف تیمار SNP اثر معنی‌داری بر میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی گل مغربی داشت (Alizadeh Salteh *et al.*, 2024). همچنین تیمار با SNP، با بهبود سیستم آنتی‌اکسیدانی، اثرهای سمی شوری بر پنبه (Liu *et al.*, 2014) را بهبود بخشید.



شکل ۲- برهم‌کنش شوری و القاگر بر ظرفیت آنتی‌اکسیدان زیتون رقم زرد

Figure 2. Interaction effect of salinity and elicitor on antioxidant capacity of olive cv. Zard

اثر مستقل شوری بر اجزای رنگیزهٔ کلروفیل (a، b و کل) معنی‌دار بود ($P<۰/۰۱$) و با افزایش شوری از محتوای کلروفیل کاسته شد. بیشترین مقدار کلروفیل در هر سه جزء در تیمارهای شوری شاهد و ۵۰ میلی‌مولار مشاهده شد. کمترین مقدار نیز مربوط به تیمارهای شوری ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار بود (جدول ۲). همچنین اثر مستقل القاگر بر محتوای کلروفیل a و

کل معنی‌دار بود (به‌ترتیب P=۰/۰۲ و P=۰/۰۴). بیشترین مقدار مربوط به تیمار نانوسیلیکون ۲۰۰ میلی‌گرم بود که با تیمارهای نانوسیلیکون ۱۰۰ میلی‌گرم و SNP ۰/۵ میلی‌مولار تفاوت معنی‌داری نداشت. کمترین مقدار نیز در تیمار شاهد مشاهده شد که با تیمارهای نانوسیلیکون ۱۰۰ میلی‌گرم، SNP ۰/۵ میلی‌مولار و SNP ۱ میلی‌مولار تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۲).

در همین راستا، ضیاتبار احمدی و همکاران (Ziatabar Ahmadi *et al*., 2023) گزارش کردند که افزایش غلظت شوری باعث تخریب ساختار کلروپلاست‌ها شده و در نهایت به کاهش کلروفیل a، b و کل منجر می‌شود. مهار بیوسنتز کلروفیل (Haghighi and Pessarakli, 2013)، تسریع تخریب آن (Jamali *et al*., 2015) و آسیب اکسیداتیو ناشی از شوری (Munns and Tester, 2008) را می‌توان از دلایل اصلی کاهش محتوای کلروفیل در شرایط تنش در نظر گرفت.

در آزمایشی بر روی گیاهان توت‌فرنگی در تیمار شوری مشخص شد که افزودن سیلیکات پتاسیم به محلول غذایی به‌طور قابل توجهی اثرهای منفی NaCl بر محتوای کلروفیل را کاهش داد. با این حال، سیلیکات پتاسیم تأثیری بر محتوای کلروفیل b نداشت (Yaghubi *et al*., 2016). این نتیجه، می‌تواند به عنوان اثر احتمالی سیلیکون بر بیوسنتز کلروفیل‌های جدید و محافظت از کلروفیل‌های موجود در برابر تنش اکسیداتیو ناشی از شوری تفسیر شود (Shekari *et al*., 2015). از جمله دلایل افزایش محتوای کلروفیل در گیاه گوجه‌فرنگی در شرایط تنش شوری، اثر سیلیسیم بر افزایش کارایی فتوسیستم II می‌باشد (Al-aghabary *et al*., 2004). سیلیسیم با تجمع در دیوارهٔ سلولی، باعث ایجاد حالت ایستادگی در گیاهان و در نتیجه افزایش جذب نور و کارایی فتوسنتز می‌شود و به افزایش تولید کلروفیل منجر می‌گردد (Morgan, 1999).

جدول ۲- اثرهای مستقل شوری و القاگر بر برخی صفات فیتوشیمیایی زیتون رقم زرد

Table 2. Independent effects of salinity and elicitor on some phytochemical characteristics of olive cv. Zard

Treatments		Chlorophyll a content (mg. g^{-1})	Chlorophyll b content (mg. g^{-1})	Total chlorophyll content (mg. g^{-1})	Total soluble sugars content (mg. g^{-1})	Total phenols content (mg. g^{-1})
NaCl (mM)	.	P<0.01	P<0.01	P<0.01	P=0.02	P<0.01
	0	0.6 ^{a}	0.17 ^{a}	0.77 ^{a}	510.09 ^{b}	228.35 ^{c}
	50	0.54 ^{a}	0.16 ^{a}	0.7 ^{a}	601.31 ^{a}	319.86 ^{b}
	100	0.46 ^{b}	0.12 ^{b}	0.59 ^{b}	625.31 ^{a}	382.55 ^{a}
	150	0.43 ^{b}	0.12 ^{b}	0.55 ^{b}	600.8 ^{a}	408.59 ^{a}
Elicitor		P=0.02	P=0.26	P=0.04	P=0.08	P<0.01
	Control	0.46 ^{b}	0.13 ^{a}	0.59 ^{b}	574.69 ^{a}	281.72 ^{c}
	Nano-Si 100 mg. l^{-1}	0.51 ^{ab}	0.14 ^{a}	0.65 ^{ab}	535.63 ^{a}	320.13 ^{bc}
	Nano-Si 200 mg. l^{-1}	0.57 ^{a}	0.15 ^{a}	0.72 ^{a}	660.27 ^{a}	333.31 ^{b}
	SNP 0.5 mM	0.53 ^{ab}	0.15 ^{a}	0.68 ^{ab}	574.52 ^{a}	338.28 ^{b}
	SNP 1 mM	0.48 ^{b}	0.13 ^{a}	0.61 ^{b}	576.77 ^{a}	400.77 ^{a}

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون با استفاده از آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار نیستند

Means within a column followed by the same letter are not significantly different at 5% probability level, according to Least Significant Difference Test (LSD)

در این آزمایش کاهش محتوای کلروفیل در اثر استفاده از نیتروپروساید سدیم بهبود یافت که با نتایج به‌دست آمده در گیاه سویا در شرایط تنش شوری مطابقت دارد (Simaei *et al*., 2011). احمد و همکاران (Ahmad *et al*., 2016) نیز

گزارش کردند که محتوای کلروفیل برگ‌های نخود در شرایط تنش شوری به‌طور معنی‌داری کاهش یافت و محلول‌پاشی نیتروپروساید سدیم باعث بهبود آن گردید.

اثر مستقل شوری بر محتوای قند محلول کل معنی‌دار بود (P=۰/۰۲) و مقدار آن در شرایط تنش نسبت به شاهد افزایش یافت. بیشترین مقدار (۶۲۵/۳۱ میلی‌گرم بر گرم) مربوط به تیمار شوری ۱۰۰ میلی‌مولار بود که با تیمارهای شوری ۵۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار تفاوت معنی‌داری نداشت. کمترین مقدار (۵۱۰/۰۹ میلی‌گرم بر گرم) نیز در تیمار شوری شاهد مشاهده شد (جدول ۲). اثر مستقل القاگر بر این صفت معنی‌دار نبود.

در مطالعه‌ای دیگر که بر روی زیتون رقم زرد انجام شد محتوای قند محلول کل برگ با افزایش شوری تا سطح ۸۰ میلی‌مولار افزایش یافت اما با افزایش بیشتر شوری مقدار آن کاهش یافت (Mousavi *et al*., 2008). افزایش قندهای محلول در اغلب شرایط تنش به عنوان یک سازوکار تحمل تنش گزارش شده است. تجمع کربوهیدرات‌ها احتمالاً از طریق افزایش تنظیم اسمزی، محافظت از مولکول‌ها و متعادل کردن یون‌های انباشته شده در واکوئل‌ها توانایی گیاهان را در جلوگیری از مرگ بافت در شرایط تنش شوری بهبود می‌بخشد (Raoufi *et al*., 2020). میزان قند محلول کل برگ در انگور رقم بیدانه سفید با افزایش سطح شوری تا حد متوسط (۱۰۰ میلی‌مولار) افزایش یافت و با شدت یافتن تنش از محتوای قند کاسته شد. افزودن SNP در این شرایط به افزایش ۸/۶ درصدی قند منجر شد (Ebrahimi *et al*., 2019). با این حال، در آزمایشی دیگر بر روی این رقم گزارش شد که میزان قندهای محلول در واکنش به SNP معنی‌دار نبود (Pileh *et al*., 2023).

اثر مستقل شوری بر محتوای فنل کل معنی‌دار بود (P<۰/۰۱). بیشترین مقدار (۴۰۸ میلی‌گرم بر گرم) در تیمار شوری ۱۵۰ میلی‌مولار مشاهده شد که با تیمار شوری ۱۰۰ میلی‌مولار تفاوت معنی‌داری نداشت. کمترین مقدار (۲۲۸ میلی‌گرم بر گرم) نیز مربوط به تیمار شاهد بود (جدول ۲). در واقع تنش شوری باعث افزایش محتوای فنل کل شد. اثر مستقل القاگر نیز بر محتوای فنل کل معنی‌دار بود (P<۰/۰۱) و محلول‌پاشی به‌ویژه SNP ۱ میلی‌مولار باعث افزایش محتوای فنل کل شد. بیشترین (۴۰۰ میلی‌گرم بر گرم) و کمترین (۲۸۱ میلی‌گرم بر گرم) مقدار به‌ترتیب مربوط به تیمارهای SNP ۱ میلی‌مولار و شاهد بود (جدول ۲).

در مطالعه‌ای دیگر بر روی چهار رقم زیتون، با افزایش سطح شوری محتوای فنل کل برگ در همهٔ ارقام افزایش یافت (Petridis *et al*., 2012). پلی‌فنول‌ها می‌توانند در شرایط تنش به عنوان حذف‌کنندهٔ گونه‌های اکسیژن واکنش‌گر بهتر عمل کنند (Brunetti et al., 2013). افزایش ترکیبات فنلی نوعی سازگاریست که برای مقابله با تنش اکسایشی ناشی از شوری عمل می‌کند. در آزمایشی بر روی انگور، با افزایش شوری میزان فنل کل برگ افزایش یافت. کاربرد اکسید نیتریک به تجمع بیشتر فنل کل در شرایط تنش شوری منجر شد (Ebrahimi *et al*., 2019). اکسید نیتریک به عنوان یک پیام‌رسان ثانویه، باعث افزایش فعالیت آنزیم فنیل آلانین آمونیالیاز در گیاه گوجه‌فرنگی شده است که این آنزیم با افزایش ساخت ترکیبات فنلی باعث افزایش تحمل گیاه در برابر تنش‌های اسمزی می‌گردد (Nasibi and Kalantari, 2009).

غلظت عناصر

برهم‌کنش شوری و القاگر بر صفات پتاسیم ریشه، سدیم ریشه، کلسیم برگ، کلسیم ریشه، نسبت پتاسیم به سدیم ریشه، نسبت کلسیم به سدیم ریشه و نسبت سدیم برگ به ریشه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. اثر مستقل شوری بر غلظت پتاسیم برگ، سدیم برگ، نسبت پتاسیم به سدیم برگ و نسبت کلسیم به سدیم برگ در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. اثر مستقل القاگر نیز بر غلظت سدیم برگ در سطح احتمال یک درصد و بر نسبت کلسیم به سدیم برگ در سطح پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۳).

برهم‌کنش شوری و القاگر بر غلظت پتاسیم ریشه معنی‌دار بود (P<۰/۰۱). بیشترین غلظت پتاسیم ریشه (۲۹/۴۷ میلی‌گرم بر لیتر) در تیمار شوری شاهد – SNP ۰/۵ میلی‌مولار مشاهده شد. کمترین مقدار (۵/۷۴ میلی‌گرم بر لیتر) نیز مربوط به تیمار شوری ۱۵۰ میلی‌مولار – القاگر شاهد بود که با تیمار شوری

۱۵۰ میلی‌مولار – SNP ۱ میلی‌مولار تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۴). افزایش شوری منجر به کاهش سطح پتاسیم ریشه شد و مصرف القاگرها به‌ویژه نانوسیلیکون ۲۰۰ میلی‌گرم غلظت پتاسیم ریشه را بهبود بخشید.

برهم‌کنش شوری و القاگر بر غلظت سدیم ریشه نیز معنی‌دار بود ($P<$۰/۰۱). در شرایط تنش شوری غلظت سدیم ریشه تا حدودی افزایش یافت، درحالی‌که محلول‌پاشی القاگرها به‌ویژه در بالاترین سطح شوری باعث افزایش غلظت سدیم ریشه شد که می‌تواند بیان‌گر نقش این ترکیبات در سازوکار عدم انتقال سدیم سمی به اندام‌های هوایی گیاه باشد. بالاترین غلظت سدیم (۱۵/۶۶ میلی‌گرم بر لیتر) مربوط به تیمار شوری ۱۵۰ میلی‌مولار – SNP ۱ میلی‌مولار بود. کمترین مقدار نیز (۹/۳۷ میلی‌گرم بر لیتر) در تیمار شوری ۱۰۰ میلی‌مولار – SNP ۱ میلی‌مولار مشاهده شد که با تیمارهای شوری ۵۰ میلی‌مولار – القاگر شاهد و شوری ۵۰ میلی‌مولار – نانوسیلیکون ۱۰۰ میلی‌گرم تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۴).

برهم‌کنش شوری و القاگر بر نسبت پتاسیم به سدیم ریشه نیز معنی‌دار بود ($P<$۰/۰۱). بیشترین نسبت (۲/۲۶) در تیمار شوری شاهد – نانوسیلیکون ۱۰۰ میلی‌گرم مشاهده شد که با تیمارهای شوری شاهد – نانوسیلیکون ۲۰۰ میلی‌گرم و شوری شاهد – SNP ۰/۵ میلی‌مولار تفاوت معنی‌داری نداشت. کمترین مقدار (۰/۴۲) نیز مربوط به تیمار شوری ۱۵۰ میلی‌مولار – SNP ۱ میلی‌مولار بود که با تیمار شوری ۱۵۰ میلی‌مولار – القاگر شاهد تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۴). در واقع، تنش شوری از مقدار نسبت پتاسیم به سدیم ریشه کاست و در بالاترین سطح شوری محلول‌پاشی نانوسیلیکون ۲۰۰ میلی‌گرم باعث افزایش این نسبت شد.

جدول ۳- تجزیه واریانس برخی عناصر زیتون رقم زرد در واکنش به تنش شوری و محلول‌پاشی القاگر

Table 3. Analysis of variance for some elements of olive cv. Zard affected by salinity stress and elicitor foliar application

S.O.V	Df	Mean of squares					
		Leaf K concentration	Root K concentration	Leaf Na concentration	Root Na concentration	Leaf Ca concentration	Root Ca concentration
Salinity	3	231.35 **	942.73 **	492.54 **	7.95 **	1566.84 *	3116.8 **
Elicitor	4	10.36 ns	12.43 **	35.16 **	11.34 **	1323.73 *	2702.4 **
Salinity × Elicitor	12	11.37 ns	22.64 **	8.24 ns	7.48 **	1163.73 **	2592.36 **
Error	40	7.72	0.26	8.02	0.21	412.27	194.13
C.V (%)		15.83	3.85	16.59	3.72	24.62	10.82

** و * اختلافات معنی‌دار را به ترتیب در سطوح احتمال یک و پنج درصد نشان می‌دهند و ns به معنی عدم وجود تفاوت معنی‌دار می‌باشد.

** and * indicate significant differences at 1% and 5% probability levels, respectively, and ns means no significant difference.

ادامهٔ جدول ۳-

Table 3. (continued)

S.O.V	Df	Mean of squares				
		Leaf K/Na ratio	Root K/Na ratio	Leaf Ca/Na ratio	Root Ca/Na ratio	Leaf/Root ratio of Na
Salinity	3	7.15 **	6.19 **	58.96 **	41.39 **	3.07 **
Elicitor	4	0.13 ns	0.06 **	7.84 *	42.14 **	0.6 ns
Salinity × Elicitor	12	0.05 ns	0.16 **	2.12 ns	28 **	0.18 **
Error	40	0.11	0.0038	2.14	1.36	0.05
C.V (%)		27.37	5.58	27	10.78	16.31

** و * اختلافات معنی‌دار را به ترتیب در سطوح احتمال یک و پنج درصد نشان می‌دهند و ns به معنی عدم وجود تفاوت معنی‌دار می‌باشد.

** and * indicate significant differences at 1% and 5% probability levels, respectively, and ns means no significant difference

جدول ٤- برهم‌کنش شوری و القاگر بر غلظت برخی عناصر زیتون رقم زرد

Table 4. Interaction effects of salinity and elicitor on the concentration of some elements of olive cv. Zard

NaCl (mM)	Elicitor	Root K concentration (mg. l^{-1})	Root Na concentration (mg. l^{-1})	Root K/Na ratio	Leaf Ca concentration (mg. l^{-1})	Root Ca concentration (mg. l^{-1})	Root Ca/Na ratio	Na Leaf/Root ratio
		P<0.01	P<0.01	P<0.01	P<0.01	P<0.01	P<0.01	P<0.01
0	Control	17.22 d	10.4 ij	1.66 bc	77.33 bc	105.33 gh	10.1 gh	1.04 gh
	Nano-Si 100 mg. l^{-1}	26.19 b	11.61 f-h	2.26 a	84 bc	125.33 d-g	10.79 e-g	0.8 h
	Nano-Si 200 mg. l^{-1}	26.13 b	12.09 f	2.17 a	70.67 bc	150.67 cd	12.45 c-e	0.81 h
	SNP 0.5 mM	29.47 a	13.51 b-d	2.18 a	82.67 bc	117.33 fg	8.67 g-i	0.63 h
	SNP 1 mM	24.16 c	13.95 bc	1.74 b	66.67 bc	85.33 h	6.11 j	0.65 h
50	Control	15.3 e	9.75 jk	1.57 c	74.67 bc	192 a	19.69 a	1.8 b-e
	Nano-Si 100 mg. l^{-1}	10.77 g	9.78 jk	1.1 d	85.33 bc	108 gh	11.1 de	1.56 d-f
	Nano-Si 200 mg. l^{-1}	14.56 e	14.08 b	1.03 d	73.33 bc	105.33 gh	7.47 ij	1.01 gh
	SNP 0.5 mM	10.77 g	13.22 cd	0.82 ef	102.67 bc	101.33 gh	7.66 ij	1.33 fg
	SNP 1 mM	12.9 f	11.78 f-h	1.1 d	96 bc	125.33 d-g	10.67 e-g	1.41 e-g
100	Control	9.22 h	12.16 f	0.76 fg	65.33 bc	177.33 ab	14.59 b	1.94 b-d
	Nano-Si 100 mg. l^{-1}	9.16 h	11.17 g-i	0.82 ef	70.67 bc	161.33 bc	14.45 bc	1.59 c-f
	Nano-Si 200 mg. l^{-1}	9.77 h	12.37 ef	0.79 e-g	81.33 bc	181.33 ab	14.66 b	1.52 d-f
	SNP 0.5 mM	7.6 ij	12.98 de	0.58 h	74.67 bc	105.33 gh	8.13 h-j	1.42 e-g
	SNP 1 mM	8.23 i	9.37 k	0.88 e	69.33 bc	122.67 e-g	13.08 b-d	2.02 ab
150	Control	5.74 l	11.93 fg	0.48 hi	80 bc	105.33 gh	8.82 g-i	2.38 a
	Nano-Si 100 mg. l^{-1}	7.04 jk	13.19 cd	0.53 h	154.67 a	113.33 fg	8.64 g-i	1.84 b-e
	Nano-Si 200 mg. l^{-1}	7.72 ij	11.04 hi	0.7 g	62.67 c	134.67 d-f	12.24 de	2 a-c
	SNP 0.5 mM	7.97 i	14.18 b	0.56 h	73.33 bc	148 c-e	10.43 e-g	1.41 e-g
	SNP 1 mM	6.55 kl	15.66 a	0.42 i	104 b	110.67 f-h	7.06 ij	1.31 fg

میانگین‌های دارای حروف مشترک درون هر ستون با استفاده از آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار نیستند.

Means within a column followed by the same letter are not significantly different at 1% probability level, according to Least Significant Difference Test (LSD).

برهم‌کنش شوری و القاگر بر غلظت کلسیم برگ معنی‌دار بود (P<۰/۰۱). سطوح مختلف شوری تأثیر معنی‌داری بر کلسیم برگ نداشت و صرفا در بالاترین سطح شوری، محلول‌پاشی نانوسیلیکون ۱۰۰ میلی‌مولار باعث افزایش غلظت این عنصر گردید. در سایر تیمارهای شوری تفاوت معنی‌داری بین سطوح مختلف القاگرها مشاهده نشد. بیشترین غلظت کلسیم برگ (۱۵۷/۶۷ میلی‌گرم بر لیتر) در تیمار شوری ۱۵۰ میلی‌مولار – نانوسیلیکون ۱۰۰ میلی‌گرم مشاهده شد. کمترین مقدار (۶۲/۶۷ میلی‌گرم بر لیتر) نیز مربوط به تیمار شوری ۱۵۰ میلی‌مولار – نانوسیلیکون ۲۰۰ میلی‌گرم بود که از نظر آماری با اکثر تیمارهای دیگر تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۴).

برهم‌کنش شوری و القاگر بر غلظت کلسیم ریشه نیز معنی‌دار بود (P<۰/۰۱)؛ بدین صورت که ابتدا با افزایش شوری غلظت کلسیم ریشه افزایش یافت اما در سطح شوری ۱۵۰ میلی‌مولار تفاوت معنی‌داری با شاهد نداشت. محلول‌پاشی القاگرها در افزایش غلظت کلسیم ریشه در

شرایط تنش نقش داشت. بیشترین مقدار (۱۹۲ میلی‌گرم بر لیتر) مربوط به تیمار شوری ۵۰ میلی‌مولار – القاگر شاهد بود که با تیمارهای شوری ۱۰۰ میلی‌مولار - القاگر شاهد و شوری ۱۰۰ میلی‌مولار – نانوسیلیکون ۲۰۰ میلی‌گرم تفاوت معنی‌داری نداشت. کمترین مقدار (۸۵/۳۳ میلی‌گرم بر لیتر) نیز در تیمار شوری شاهد – SNP ۱ میلی‌مولار مشاهده شد که با برخی تیمارهای دیگر از نظر آماری تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۴).

برهم‌کنش شوری و القاگر بر نسبت کلسیم به سدیم ریشه معنی‌دار بود ($P<۰/۰۱$). در بالاترین سطح شوری مقدار این نسبت کمتر از سایر سطوح بود و محلول‌پاشی نانوسیلیکون ۲۰۰ میلی‌گرم به افزایش آن منجر شد. بالاترین مقدار (۱۹/۶۹) مربوط به تیمار شوری ۵۰ میلی‌مولار – القاگر شاهد بود. کمترین مقدار (۶/۱۱) نیز در تیمار شوری شاهد – SNP ۱ میلی‌مولار مشاهده شد که با برخی تیمارهای دیگر تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۴).

برهم‌کنش شوری و القاگر بر نسبت سدیم برگ به ریشه معنی‌دار بود ($P<۰/۰۱$). بالاترین مقدار (۲/۳۸) در تیمار شوری ۱۵۰ میلی‌مولار – القاگر شاهد مشاهده شد که با تیمارهای شوری ۱۰۰ میلی‌مولار – SNP ۱ میلی‌مولار و شوری ۱۵۰ میلی‌مولار – نانوسیلیکون ۲۰۰ میلی‌گرم تفاوت معنی‌داری نداشت. کمترین نسبت نیز مربوط به تیماری شوری شاهد – SNP ۰/۵ میلی‌مولار بود که با سایر تیمارهای شوری شاهد و نیز تیمار شوری ۵۰ میلی‌مولار – نانوسیلیکون ۲۰۰ میلی‌گرم تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۴). با افزایش سطح شوری مقدار این نسبت افزایش یافت و نسبت به ریشه مقدار سدیم بیشتری در برگ‌ها تجمع یافت. کاربرد القاگرها به‌ویژه SNP ۰/۵ میلی‌مولار از مقدار این نسبت کاست و بدین طریق اثرات مخرب شوری را بهبود بخشید (جدول ۴).

اثر مستقل شوری بر غلظت پتاسیم برگ معنی‌دار بود ($P<۰/۰۱$). بالاترین سطح شوری باعث کاهش غلظت پتاسیم برگ نسبت به شاهد شد. بیشترین مقدار (۲۰/۱۳ میلی‌گرم بر لیتر) در تیمار شوری شاهد مشاهده شد که با تیمارهای شوری ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌مولار تفاوت معنی‌داری نداشت. کمترین مقدار (۱۱/۷۹ میلی‌گرم بر لیتر) نیز مربوط به تیمار ۱۵۰ میلی‌مولار بود. محلول‌پاشی القاگرها اثر معنی‌داری بر غلظت پتاسیم برگ نداشت (جدول ۵).

اثرهای مستقل شوری و القاگر بر غلظت سدیم برگ معنی‌دار بود ($P<۰/۰۱$). بیشترین (۲۲/۹۶ میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین (۹/۵۲ میلی‌گرم بر لیتر) غلظت سدیم برگ به‌ترتیب مربوط به تیمارهای شوری ۱۵۰ میلی‌مولار و شاهد بود. با افزایش سطح شوری غلظت سدیم برگ افزایش یافت؛ درحالی‌که محلول‌پاشی القاگرها باعث کاهش غلظت سدیم برگ شد و بالاترین مقدار (۲۰/۱۱ میلی‌گرم بر لیتر) در تیمار القاگر شاهد مشاهده شد. بین غلظت‌های مختلف نانوسیلیکون و SNP از نظر آماری تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد (جدول ۵).

همچنین اثر مستقل شوری بر نسبت پتاسیم به سدیم برگ معنی‌دار بود ($P<۰/۰۱$) و افزایش سطح شوری به کاهش این نسبت در برگ منجر شد. بالاترین (۲/۱۷) و پایین‌ترین (۰/۵۴) نسبت به‌ترتیب در تیمارهای شوری شاهد و ۱۵۰ میلی‌مولار مشاهده شد. اثر مستقل القاگر بر این نسبت معنی‌دار نبود (جدول ۵).

اثر مستقل شوری بر نسبت کلسیم به سدیم برگ نیز معنی‌دار بود ($P<۰/۰۱$) و با افزایش تنش شوری از مقدار این نسبت کاسته شد. بالاترین نسبت (۸/۱۹) مربوط به تیمار شوری شاهد بود و کمترین نسبت (۳/۷۹) نیز در تیمار شوری ۱۵۰ میلی‌مولار مشاهده شد که با تیمار شوری ۱۰۰ میلی‌مولار تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۵). همچنین اثر مستقل القاگر بر نسبت کلسیم به سدیم برگ معنی‌دار بود ($P=۰/۰۱$). بالاترین نسبت (۶/۳۱) در تیمار نانوسیلیکون ۱۰۰ میلی‌گرم مشاهده شد که با هر دو تیمار SNP تفاوت معنی‌داری نداشت. کمترین نسبت (۴/۲۷) نیز مربوط به تیمار شاهد بود که با تیمار

نانوسیلیکون ۲۰۰ میلی‌گرم تفاوت معنی‌داری نشان نداد (جدول ۵).

جدول ۵- اثرهای مستقل شوری و القاگر بر غلظت برخی عناصر زیتون رقم زرد

Table 5. Independent effects of salinity and elicitor on the concentration of some elements of olive cv. Zard

Treatments		Leaf K concentration (mg. l^{-1})	Leaf Na concentration (mg. l^{-1})	Leaf K/Na ratio	Leaf Ca/Na ratio
NaCl (mM)		P<0.01	P<0.01	P<0.01	P<0.01
	0	20.13 ^{a}	9.52 ^{d}	2.17 ^{a}	8.19 ^{a}
	50	19.99 ^{a}	16.23 ^{c}	1.27 ^{b}	5.46 ^{b}
	100	18.3 ^{a}	19.54 ^{b}	0.96 ^{c}	4.22 ^{c}
	150	11.79 ^{b}	22.96 ^{a}	0.54 ^{d}	3.79 ^{c}
Elicitor		P=0.27	P<0.01	P=0.38	P=0.01
	Control	16.25 ^{a}	20.11 ^{a}	1.06 ^{a}	4.27 ^{c}
	Nano-Si 100 mg. l^{-1}	17.3 ^{a}	16.6 ^{b}	1.24 ^{a}	6.31 ^{a}
	Nano-Si 200 mg. l^{-1}	18.84 ^{a}	16.26 ^{b}	1.34 ^{a}	4.99 ^{bc}
	SNP 0.5 mM	17.73 ^{a}	16.07 ^{b}	1.27 ^{a}	5.96 ^{ab}
	SNP 1 mM	17.64 ^{a}	16.28 ^{b}	1.27 ^{a}	5.54 ^{ab}

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون با استفاده از آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال یک یا پنج درصد معنی‌دار نیستند.

Means within a column followed by the same letter are not significantly different at 1% or 5% probability level, according to Least Significant Difference Test (LSD)

افزایش غلظت نمک‌های محلول، مانند NaCl، منجر به افزایش غلظت یون‌های Na^{+} و Cl^{-} در محلول خاک و متعاقباً در گیاه می‌شود. جذب بالای Na^{+} توسط گیاه، مانع از جذب یون‌های K^{+} و Ca^{2+} می‌شود. سطوح بالای Na^{+} در گیاه به سلول‌های گیاه آسیب می‌رساند، سوخت‌وساز سلولی را مختل می‌کند و به تولید گونه‌های اکسیژن واکنش‌گر منجر می‌شود و در نهایت رشد گیاه را کاهش می‌دهد (Mahajan and Tuteja, 2005). در چنین شرایطی، گیاهان با کاهش ورود یون Na^{+} از محلول خارجی به سیتوسول و افزایش خروج این یون از سیتوسول به واکوئل‌ها، که منجر به کاهش ذخایر Na^{+} سیتوسولی می‌شود، تحمل خود را در برابر تنش شوری افزایش می‌دهند (Munns and Tester, 2008). زینانلو و همکاران (Zeinanloo *et al.*, 2020) بیان کردند که مقدار سدیم ریشه نسبت به ساقه و برگ بیشتر بود. به عبارتی مقدار تجمع سدیم از ریشه به بخش هوایی گیاه سیر نزولی داشت. درصد انتقال سدیم از ریشه به ساقه و برگ در ارقام حساس بیشتر از ارقام متحمل می‌باشد.

سیلیسیم می‌تواند با افزایش فعالیت ریشه (Chen *et al.*, 2011) و بهبود هدایت هیدرولیکی ریشه‌ها (Hattori *et al.*, 2008) جذب مواد غذایی را افزایش دهد. از آن‌جایی که مواد غذایی عمدتاً از ریشه جذب می‌شوند، به نظر می‌رسد که افزایش سطح و طول ریشه می‌تواند مکان‌های بیشتری را برای جذب یون‌های قابل انتشار فراهم کند (Barber, 1995). برخی از محققان افزایش جذب برخی از مواد غذایی، مانند Ca^{2+} و K^{+}، را به کاهش نفوذپذیری غشای پلاسمایی و نیز افزایش فعالیت H^{+}-ATP غشای پلاسمایی ناشی از سیلیسیم نسبت دادند (Kaya *et al.*, 2006). سیلیکون با افزایش اتصال سدیم به دیوارهٔ سلولی ریشه‌های گندم، از انتقال یون سدیم به بخش‌های هوایی ارقام حساس و متحمل به شوری گندم جلوگیری کرد (Saqib *et al.*, 2008). در بیشتر گیاهان، شوری باعث کاهش سطح کلسیم می‌شود

که منجر به نفوذپذیری غشا و سایر اثرهای مضر آن می‌شود (Ashraf *et al*., 2004). در آزمایشی بر روی فلفل دلمه‌ای با افزایش سطح شوری غلظت کلسیم افزایش یافت که به کاهش ۷۰ درصدی بیومس گیاه در سطوح بالای شوری و در نتیجه، غلیظ شدن کلسیم نسبت داده شد (Dehghani *et al*., 2024). با این حال، کریمی و همکاران (Karimi *et al*., 2023) گزارش کردند که کلسیم برگ تحت تأثیر تنش شوری قرار نگرفت و نسبت سدیم به کلسیم برگ با افزایش سطح شوری افزایش یافت که با نتایج حاصل از این پژوهش مطابقت داشت.

کاربرد اکسید نیتریک خارجی نقش مؤثری در هموستاز یون سلولی دارد و باعث بهبود جذب مواد مغذی ضروری می‌شود (Kaya *et al*., 2015). گزارش شده است که محلول‌پاشی SNP رشد گیاهچهٔ پنبه را بهبود بخشید؛ این افزایش رشد ممکن است به دلیل جذب کم Na^+ و افزایش تجمع برخی از مواد مغذی ضروری مانند Ca^{2+} و K^+ رخ داده باشد (Liu *et al*., 2014). شواهد نشان می‌دهد که اکسید نیتریک باعث حفاظت در برابر تنش شوری در شرایط in vivo می‌شود به‌طوری‌که در موتانت‌های آرابیدوپسیس AtNOA1 با سطوح مختل شدهٔ اکسید نیتریک درون‌زا، این گیاهان حساسیت بیشتری به تنش شوری نشان دادند و نیز میزان بقا در مقایسه با گیاهان نوع وحشی کاهش یافت. علاوه‌بر این، نسبت Na^+/K^+ در شاخه‌های این موتانت‌ها در مقایسه با نوع وحشی بالا بود (Zhao *et al*., 2007).

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج حاصل از این آزمایش، قلمه‌های یک‌سالهٔ زیتون رقم زرد در مقابل غلظت‌های بالای کلرید سدیم حساس بود و از مقادیر کلروفیل و کاروتنوئید کاسته شد. همچنین محتوای قند محلول کل، فنل کل و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی افزایش یافت. افزایش این آنتی‌اکسیدان‌های غیرآنزیمی از جمله سازوکارهای تحمل گیاه در برابر تنش شوری و مقابله با تنش اکسیداتیو ناشی از شوری می‌باشد. محلول‌پاشی القاگرها باعث تعدیل فعالیت آنتی‌اکسیدان و افزایش محتوای کاروتنوئید در شرایط تنش شد. همچنین محلول‌پاشی به افزایش محتوای کلروفیل و فنل کل برگ منجر شد. با افزایش شوری غلظت سدیم برگ و ریشه افزایش یافت و افزایش غلظت سدیم برگ مشهودتر از ریشه بود. کاربرد القاگرها از تجمع بیشتر یون سمی درون گیاه جلوگیری کرد و باعث کاهش غلظت سدیم برگ و افزایش غلظت سدیم ریشه گردید. همچنین شوری باعث کاهش غلظت پتاسیم و نیز نسبت پتاسیم به سدیم برگ و ریشه شد و در بالاترین سطح شوری، محلول‌پاشی نانوسیلیکون ۲۰۰ میلی‌گرم به بهبود این نسبت در سطح ریشه منجر شد. غلظت کلسیم برگ تحت تأثیر غلظت نمک قرار نگرفت اما در بالاترین سطح شوری محلول‌پاشی نانوسیلیکون ۱۰۰ میلی‌گرم باعث افزایش غلظت کلسیم برگ شد. با این حال غلظت کلسیم ریشه در سطوح شوری ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌مولار نسبت به شاهد افزایش داشت. همچنین در بالاترین سطح شوری SNP ۰/۵ میلی‌مولار در سطح ریشه باعث افزایش کلسیم شد. در مجموع نانوسیلیکون ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر در کاهش اثرهای مخرب شوری بر صفات بیوشیمیایی مؤثرتر بود.

سپاس‌گزاری

بدین‌وسیله از گروه مهندسی علوم باغبانی و فضای سبز دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان جهت در اختیار قرار دادن فضای گلخانه و آزمایشگاه در راستای پیشبرد اهداف این پژوهش کمال تشکر را داریم.

References

Abbas, T., Balal, R.M., Shahid, M.A., Pervez, M.A., Ayyub, C.M., Aqueel, M.A., & Javaid, M.M. (2015). Silicon-induced alleviation of NaCl toxicity in okra (*Abelmoschus esculentus*) is associated with enhanced photosynthesis, osmoprotectants and antioxidant metabolism. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2, 6-20. https://doi.org/10.1007/s11738-014-1768-5

Ahmad, P., Abdel Latef, A.A., Hashem, A., Abd-Allah, E.F., Gucel, S., & Tran, L-SP. (2016). Nitric oxide mitigates salt stress by regulating levels of osmolytes and antioxidant enzymes in Chickpea. *Frontiers in Plant Science*, 7, 347-358. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00347

Alaei, S., & Tafazzoli, A. (2009). The effect of salinity and plant growth regulators (kinetin and cycocel) on the vegetative growth of olive cultivar Dezful. *Scientific Research Quarterly Journal of Plant and Ecosystem*, 17, 83-97. https://doi.org/10.22067/jhorts4.v0i0.14661 [In Persian].

Al-aghabary, K., Zhujun, Z., & Qinhua, S. (2004). Influence of silicon supply on chlorophyll content, chlorophyll fluorescence and antioxidative enzyme activities in tomato plants under salt stress. *Journal of Plant Nutrition*, 27, 2101-2115. https://doi.org/10.1081/PLN-200034641

Ali, Q., Ashraf, M., Shahbaz, M., & Humera, M. (2008). Ameliorating effect of foliar applied proline on nutrient uptake in water stressed maize (*Zea mays* L.) plants. *Pakistan Journal of Botany*, 40, 211-219.

Alizadeh Salteh, S., Nourizad Ahmedabad, A., Bolandnazar, S., & Amani, M. (2024). The effect of sodium nitroprusside on some morphological and physiological characteristics of evening primrose (*Oenothera biennis* L.) under salt stress. *Plant Productions*, https://doi.org/10.22055/ppd.2024.47316.2186 [In Persian].

Ashraf, M. 2004. Some important physiological selection criteria for salt tolerance in plants. *Flora*, 199, 361-376. https://doi.org/10.1078/0367-2530-00165

Ashraf, M., Mukhtar, N., Rehman, S., & Rha, E.S. (2004). Salt-induced changes in photosynthetic activity and growth in a potential medicinal plant bishop's weed (*Ammi majus* L). *Photosynthetica*, 42, 543-550. https://doi.org/10.1007/S11099-005-0011-4

Barber, S.A. (1995). Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach. John Wiley & Sons press.

Barnes, J.D., Balaguer, L., Maurigue, E., Elvira, S., & Davison, A.W. (1992). A reappraisal of the use of DMSO for the extraction and determination of chlorophyll 'a' and 'b' in lichens and higher plants. *Environmental and Experimental Botany*, 32 (2), 85-100. https://doi.org/10.1016/0098-8472(92)90034-Y

Blois, M. S. (1958). Antioxidant determinations by the use of a stable free radical. *Nature*, 4617, 1199-1200.

Brunetti, C., Di Ferdinando, M., Fini, A., Pollastri, S., & Tattini, M. (2013). Flavonoids as antioxidants and developmental regulators: relative significance in plants and humans. *International Journal of Molecular Sciences*, 14, 3540-3555. https://doi.org/10.3390/ijms14023540

Chartzoulakis, K., Loupassaki, M., Bertaki, M., & Androulakis, I. (2002). Effects of NaCl salinity on growth, ion content and CO_2 assimilation rate of six olive cultivars. *Scientia Horticulturae*, 96, 235-247. https://doi.org/10.1016/S0304-4238(02)00067-5

Chen, W., Yao, X., Cai, K., & Chen, J. (2011). Silicon alleviates drought stress of rice plants by improving plant water status, photosynthesis and mineral nutrient absorption. *Biological Trace Element Research*, 142, 67-76. https://doi.org/10.1007/s12011-010-8742-x

Daryabeigi, A., Abtahi, F., & Salehi Arjmad, H. (2023). Evaluation of salinity tolerance of some native ajwain (*Trachyspermum copticum* L.) populations of Iran. *Plant Productions*, 46(2), 251-262. https://doi.org/10.22055/ppd.2023.42680.2069 [In Persian].

Dehghani, M.K., Ghasemi, R., Safarzadeh, S., & Etemadi, M. (2024). Effects of silicon and humic Acid on some physiological responses in bell pepper at different salinity levels. *Iranian Journal of Soil Research (Soil and Water Science)*, 38(2), 181-195. [In Persian].

Ebrahimi, M., Karimi, R., & Amerian, M. (2019). The effect of foliar application of nitric oxide in alleviating of salt stress in 'Bidaneh Sefid' grapevine cultivar. *Iranian Journal of Plant Biology*, 11(1), 59-64. https://doi.org/10.22108/ijpb.2019.114329.1129 [In Persian].

Elhami, B., Samandari Giklou, T., Kamrani, M., & Azizdoost, H. (2015). *The effect of nitric oxide on water relations, antioxidant activity and osmotic regulation in olive cultivar Conservalia*. Presented at the Conference 4th Organic and Conventional Agriculture, Ardabil. [In Persian].

Epstein, E. (1994). The anomaly of silicon in plant biology. *Proceedings of the National Academy* of *Sciences*, 91, 11-17. https://doi.org/10.1073/pnas.91.1.11

Fan, H. F., Du, C. X., & Guo, S. R. (2013). Nitric oxide enhances salt tolerance in cucumber seedlings by regulating free polyamine content. *Environmental and Experimental Botany*, 86, 52-59. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2010.09.007

Freeman, E., & Edelman, D. (1959). Simple method for derivative differential thermal analysis. *Analytical Chemistry*, 31(4), 624-625. https://doi.org/10.1021/ac50164a055

Garg, B.K. (2003). Nutrient uptake and management under drought: nutrient–moisture interaction. *Current Agriculture*, 27, 1-8. https://doi.org/10.5555/20043161256

Ghorbani, A., Sarikhani, H., & Zeinanloo, A.A. (2023). The effect of silicon dioxide nanoparticles (SiO_2) on chlorophyll content and chlorophyll fluorescence of five olive cultivars under salinity stress. *Iranian society for horticultural science*, 24(3), 333-344. [In Persian].

Gratäo, P.L., Polle, A., Lea, P.J., & Azevedo, R.A. (2005). Making the life of heavy metal-stressed plants a little easier. *Functional Plant Biology*, 32, 481-494. https://doi.org/10.1071/FP05016

Gucci, R., & Tattini, M. (1997). Salinity tolerance in olive. *Horticultural Reviews*, 21, 177-214. https://doi.org/10.1002/9780470650660.ch6

Haghighi, M., & Pessarakli, M. (2013). Influence of silicon and nano-silicon on salinitytolerance of cherry tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) at early growth stage. *Scientia Horticulturae*, 161, 111-117. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.06.034

Hamdi Shengri, A., Rahnama, A., Monsefi, A., Roshanfekr, H. A., & Noroozi, H. (2025). Effect of foliar application of silicon on yield and quality of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) under deficit irrigation conditions. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 27 (1), 23-39. http://agrobreedjournal.ir/article-1-1412-fa.html [In Persian].

Hashemi, A., Abdolzadeh, A., & Sadeghipour, H.R. (2010). Beneficial effects of silicon nutrition in alleviating salinity stress in hydroponically grown canola, *Brassica napus* L., plants. *Journal of Soil Science* and *Plant Nutrition*, 56, 244-253. https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2009.00443.x

Hattori, T., Sonobe, K., Araki, H., Inanaga, S., An, P., & Morita, S. (2008). Silicon application by sorghum through the alleviation of stress-induced increase in hydraulic resistance. *Journal of Plant Nutrition*, 31, 1482-1495. https://doi.org/10.1080/01904160802208477

Heuer, B. (2005). Photosynthetic carbon metabolism of crops under salt stress. In Pessarakli, M. (Ed.), *Handbook of Photosynthesis* (pp, 779-792). Florida, USA: Taylor and Francis Group, LLC, Boca Raton.

Hilal, M., Zenoff, A.M., Ponessa, G., Moreno, H., & Massa, E.D., (1998). Saline stress alters the temporal patterns of xylem differentiation and alternative oxidative expression in developing soybean roots. *Plant Physiology*, 117, 695-701. https://doi.org/10.1104/pp.117.2.695

Inanaga, S., & Okasaka, A. (1996). Calcium and silicon binding compounds in cell walls of rice shoots. *Soil Science and Plant Nutrition*, 41, 103-110. https://doi.org/10.1080/00380768.1995.10419563

Jamali, B., Eshghi, S., & Tafazoli, E., (2015). Mineral composition of 'Selva' strawberry asaffected by time of application of nitric oxide under saline conditions. *Horticulture, Environment and Biotechnology*, 56, 273-279. https://doi.org/10.1007/s13580-015-0116-z

Kafi, M., & Rahimi, Z. (2011). Effect of salinity and silicon on root characteristics, growth, water status, proline content and ion accumulation of purslane (*Portulaca oleracea* L.). *Soil Science* and *Plant Nutrition*, 57, 341-347. https://doi.org/10.1080/00380768.2011.567398

Kaiser, W.M., Weiner, H., Kandibimder, A., Tsai, C.B., Rockel, P., Sonoda, M., & Planchet, E. (2002). Modulation of nitrate reductase: some newinsights an unusual case and a potentially important side reaction. *Journal of Experimental Botany*, 53, 875-882. https://doi.org/10.1093/jexbot/53.370.875

Karimi, S., Rahemi, M., & Zeinanloo, A.A. (2023). Ion compartmentalization determines salinity tolerance in olive cultivars. *Erwerbs-Obstbau*, 65(6), 2527-2536. https://doi.org/10.1007/s10341-023-00950-4

Kaya, C., Tuna, L., & Higgs, D. (2006). Effect of silicon on plant growth and mineral nutrition of maize grown under water-stress conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 29, 1469-1480. https://doi.org/10.1080/01904160600837238

Kaya, C., Ashraf, M., Sonmez, O., Levent, A., & Aydemir, S. (2015). Exogenously applied nitric oxide confers tolerance to salinity-induced oxidative stress in two maizes (*Zea mays* L.) cultivars differing in salinity tolerance. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 39, 909-919. https://doi.org/10.3906/tar-1411-26

Kim, J.H., & Lee, C.H. (2005). In vivo deleterious effects specific to reactive oxygen species on photosystem II after photooxidative treatment of rice leaves. *Plant Science*, 168, 1115-1125. https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2004.12.012

Lipton, S.A., Choi, Y.B., Pan, Z.H., Lei, S.Z., Chen, H.S.V., Sucher, N.J., Loscalzo, J., Singel, D.J., & Stamler, J.S. (1993). A redox-based mechanism for the neuroprotective and neurodestructive effects of nitric oxide and related nitroso-compounds. *Nature*, 364, 626-632. https://doi.org/10.1038/364626a0

Liu, S., Dong, Y., Xu, L., & Kong, J. (2014). Effects of foliar applications of nitric oxide and salicylic acid on salt-induced changes in photosynthesis and antioxidative metabolism of cotton seedlings. *Plant Growth Regulation*, 73, 67-78. https://doi.org/10.1007/s10725-013-9868-6

Ma, J.F., & Takahashi, E. (2002). Soil, fertilizer and plant silicon research in Japan. Elsevier Science, Amsterdam, the Netherlands.

Mahajan, S., & Tuteja, N. (2005). Cold, salinity and drought stresses: an overview. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 444, 139-158. https://doi.org/10.1016/j.abb.2005.10.018

Martinez, G.R., Mascio, P.D., Bonini, M.G., Augusto, O., Briviba, K., & Sies, H. (2000). Peroxynitrite does not decompose to singlet oxygen ($1gO_2$) and nitroxyl (NO-). *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97, 10307-10312. https://doi.org/10.1073/pnas.190256897

McCready, R.M., Guggolz, J., Silviera, V., & Owens, H.S. (1950). Determination of starch and amylase in vegetables. *Analytical chemistry*, 22, 1156-1158. http://dx.doi.org/10.1021/ac60045a016

Molassiotis, A., Sotiropoulos, T., Tanou, G., Diamantidis, G., & Therios, I. (2006). Boron-induced oxidative damage and antioxidant and nucleolytic responses in shoot tips culture of the apple rootstock EM9 (*Malus domestica* Borkh). *Environmental and Experimental Botany*, 56, 54-62. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.01.002

Morgan, L. (1999). Silica in hydroponics. *Practical Hydroponics and Greenhouses*. July/August, 51-66.

Mousavi, A., Lessani, H., Babalar, M., Talaei, A. R., & Fallahi, E. (2008). Influence of salinity on chlorophyll, leaf water potential, total soluble sugars, and mineral nutrients in two young olive cultivars. *Journal of Plant Nutrition*, 31(11), 1906-1916. https://doi.org/10.1080/01904160802402807

Munns, R., & Tester, M., (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *The Annual Review of Plant Biology*, 59, 651-681. https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911

Nasibi, F., & Kalantari, K. M. (2009). Influence of nitric oxide in protection of tomato seedling against oxidative stress induced by osmotic stress. *Acta physiologiae plantarum*, 31, 1037-1044. https://doi.org/10.1007/s11738-009-0323-2

Parida, A.K., & Das, A.B. (2005). Salt tolerance and salinity effects on plant. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 60, 324-349. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2004.06.010

Parveen, N., & Ashraf, M. (2010). Role of silicon in mitigating the adverse effects of salt stress on growth and photosynthetic attributes of two maizes (*Zea mays* L.) cultivars grown hydroponically. *Pakistan Journal of Botany*, 42 (3), 1675-1684.

Petridis, A., Therios, I., Samouris, G., & Tananaki, C. (2012). Salinity-induced changes in phenolic compounds in leaves and roots of four olive cultivars (*Olea europaea* L.) and their relationship to antioxidant activity. *Environmental and Experimental Botany*, 79, 37-43. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.01.007

Pileh, F., Ebadi, A., Zamani, Z., & Babalar, M. (2023). Physiological and biochemical reactions of some grape cultivars and rootstocks treated with sodium nitroprusside under salt stress conditions. *Iranian Journal of Horticultural Science*, 54 (4), 661-683. https://doi.org/10.22055/ppd.2024.47316.2186 [In Persian].

Poury, N., Seifi, E., & Alizadeh, M. (2023). Effects of salinity and proline on growth and physiological characteristics of three olive cultivars. *Gesunde Pflanzen*, 75(4), 1169-1180. https://doi.org/10.1007/s10343-022-00778-0

Qadar, A., (1995). Potassium and sodium contents of shoots and laminae of rice cultivars and their sodicity tolerance. *Plant Nutrition*, 18, 2281-2290. https://doi.org/10.1080/01904169509365064

Qian, Q.Q., Zai, W.S., Zhu, Z.J., & Yu, J.Q. (2006). Effects of exogenous silicon on active oxygen scavenging systems in chloroplasts of cucumber (*Cucumis sativus* L.) seedlings under salt stress. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 32, 107-112.

Raoufi, A., Rahemi, M., Salehi, H., & Javanshah, A. (2020). Selecting high performance rootstocks for pistachio cultivars under salinity stress based on their morpho-physiological characteristics. *International Journal of Fruit Science*, 20(2), 29-47. https://doi.org/10.1080/15538362.2019.1701616

Sanitata, L., & Gabbriella, R. (1999). Response to cadmium in higher plants–Review. *Environment and Experimental Botany*, 45, 105-130. https://doi.org/10.1016/S0098-8472(98)00058-6

Saqib, M., Zörb, C., & Schubert, S., (2008). Silicon-mediated improvement in the salt resistance of wheat (*Triticum aestivum*) results from increased sodium exclusion and resistance to oxidative stress. *Functional Plant Biology*, 35, 633-639. https://doi.org/10.1071/FP08100

Shekari, F., Abbasi, A., & Mustafavi, S.H., (2017). Effect of silicon and selenium onenzymatic changes and productivity of dill in saline condition. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 16(4), 367-374. https://doi.org/10.1016/j.jssas.2015.11.006

Siddiqui, M.H., Alamri, S.A., Al-Khaishany, M.Y., Al-Qutami, M.A., Ali, H.M., AL-Rabiah, H., & Kalaji, H.M. (2017). Exogenous application of nitric oxide and spermidine reduces the negative effects of salt stress on tomato. *Horticulture, Environment and Biotechnology*, 58 (6), 537-547. https://doi.org/10.1007/s13580-017-0353-4

Simaei, M., Khavari-Nejad, R.A., Saadatmand, S., Bernard, F., & Fahimi, H. (2011). Effect of salicylic acid and nitric oxide on antioxidant capacity and proline accumulation in *Glycine max* L. treated with NaCl salinity. *African Journal of Agricultural Research*, 6(16), 3775-3782. https://doi.org/10.5897/AJAR10.1088

Slinkard, K., & Singleton, V.L. (1997). Total phenol analysis; automation and comparison with manual methods. *American Society for Enology and Viticulture*, 28, 49-55. https://doi.org/10.5344/ajev.1977.28.1.49

Tattini, M. (1994). Ionic relations of aeroponically-grown olive plants during salt stress. *Plant Soil*, 161, 251-256. https://doi.org/10.1007/BF00046396

Veisi, Z., Ghorbanpour, M., & Akramian, M. (2022). The effects of silicon nanoparticles on morpho-physiological and biochemical parameters of *Calendula officinalis* L. plants under salinity stress in hydroponic culture conditions. *Journal of Plant Process and Function*, 11(47), 211-229. [In Persian].

Vinocur, B., & Altman, A. (2005). Recent advances in engineering plant tolerance to abiotic stress: achievement and limitations. *Current Opinion in Plant Biology*, 16, 123-132. https://doi.org/10.1016/j.copbio.2005.02.001

Yaghubi, K.h., Ghaderia, N., Vafaeea, Y., & Javadi, T. (2016). Potassium silicate alleviates deleterious effects of salinity on twostrawberry cultivars grown under soilless pot culture. *Scientia Horticulturae*, 213, 87-95. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.10.012

Zeinanloo, A.A., Dodangeh, M., & Tavoosi, S.M. (2020). Evaluation of salinity tolerance in six olive (*Olea europaea* L.) genotypes in controlled environment. *Seed and Plant*, 36(3), 317-333. https://doi.org/10.22092/sppi.2020.123486 [In Persian].

Zhao, M.G., Tian, Q.Y., & Zhang, W.H. (2007). Nitric oxide synthase-dependent nitric oxide production is associated with salt tolerance in Arabidopsis. *Plant Physiology*, 144, 206-217. https://doi.org/10.1104/pp.107.096842

Zhu, Y., Jiang, X., Zhang, J., He, Y., Zhu, X., Zhou, X., Gong, H., Yin, J., & Liu, Y. (2020). Silicon confers cucumber resistance to salinity stress through regulation of proline and cytokinins. *Plant Physiology and Biochemistry*, 156, 209-220. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.09.014

Ziatabar Ahmadi, S. R., Seifi, E., Varasteh, F., & Akbarpour, V. (2023). The effect of salinity stress on morphological and physicochemical traits of pomegranate to select the tolerant genotypes and cultivars. *Plant Productions*, 46(2), 199-211. https://doi.org/10.22055/ppd.2023.42780.2073 [In Persian].