مقاله پژوهشی

بررسی اثر اسید سالیسیلیک در شرایط تنش خشکی بر برخی صفات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه خرفه (*Portulaca oleracea* L.)

فرناز ساحری[۱]، گیتی برزین[۱*]، لیلا پیشکار[۱]، مسعود مشهدی اکبر بوجار[۲] و لاله بابائی‌خو[۱]

[۱] گروه زیست‌شناسی، واحد اسلامشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اسلامشهر، [۲] دانشکده علوم زیستی، دانشگاه خوارزمی، تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۱۳، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۰۶/۱۶)

چکیده

با توجه به روند افزایشی توسعه اراضی خشک و کمبود اراضی مطلوب برای کشاورزی در دنیا، استفاده از گونه‌های گیاهی مقاوم به خشکی یا کاربرد ترکیباتی که باعث کاهش اثرات تنش خشکی و القای مقاومت در مقابل تنش در گیاهان می‌شوند، اهمیت زیادی دارد. در مطالعه حاضر، تأثیر محلول‌پاشی برگی اسید سالیسیلیک (صفر، ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار) بر پاسخ‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه خرفه، تحت تنش خشکی (۹۰، ۶۰ و ۳۰ درصد ظرفیت زراعی) به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار در دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که تنش خشکی ۶۰ و ۳۰ درصد ظرفیت زراعی باعث کاهش ارتفاع (به‌ترتیب ۱۸/۵ و ۴۵ درصد) و وزن خشک کل گیاه (۴۳/۱ و ۵۸/۶ درصد) نسبت به شاهد (۹۰ درصد ظرفیت زراعی) شدند. تنش خشکی به‌ویژه خشکی ۳۰ درصد ظرفیت زراعی باعث کاهش رنگیزه‌های فتوسنتزی، کاهش محتوای آب نسبی برگ، پایداری غشا و القای تنش اکسیداتیو (افزایش سطح متیل گلی‌اکسال و مالون دی‌آلدئید) شد. با این‌حال، کاربرد برگی اسید سالیسیلیک با تنظیم متابولیسم کلروفیل (فعالیت آنزیم‌های کلروفیلاز و دلتا-آمینولوولینیک اسید دهیدراتاز) و بهبود متابولیسم پرولین (فعالیت آنزیم‌های پرولین دهیدروژناز و دلتا-۱-پرولین-۵-کربوکسیلات سنتتاز ۱)، باعث افزایش محتوای کلروفیل و تجمع پرولین و درنتیجه، بهبود کارایی دستگاه فتوسنتز و محتوای آب نسبی برگ تحت تنش خشکی شد. اسید سالیسیلیک همچنین از طریق افزایش فعالیت آنزیم‌های سیستم گلی‌اکسالاز و بهبود حالت اکسایس-کاهش چرخه آسکوربیک اسید-گلوتاتیون، باعث بهبود تحمل گیاه به تنش خشکی شد. بنابراین، اسید سالیسیلیک تحت شرایط تنش خشکی می‌تواند در کاهش و تعدیل اثرات منفی تنش نقش مؤثری داشته باشد.

کلمات کلیدی: تنش خشکی، اسید سالیسیلیک، سیستم گلی‌اکسالاز، تنش اکسیداتیو، تبادلات گازی

مقدمه

تنش خشکی باعث کاهش جذب آب توسط ریشه گیاه می‌شود که با تغییر در فرآیندهای متابولیکی مهم، تأثیر منفی بر رشد و عملکرد گیاهان دارد (Takahashi *et al.*, 2020). دو عامل اصلی ایجاد تنش آبی در گیاهان کاهش تأمین آب مورد نیاز در اطراف ریشه و تعرق زیاد توسط برگ است که همزمان در مناطق خشک و نیمه‌خشک اتفاق می‌افتد. اثرات تنش خشکی بر رشد گیاه به عوامل مختلفی از جمله مرحله رشد گیاه، گونه گیاهی، مدت زمان و درجه تنش خشکی بستگی دارد. تنش خشکی باعث تغییر در متابولیسم مواد مغذی، رشد ریشه،

*نویسنده مسؤل، نشانی پست الکترونیکی: Gitibarzin@iiau.ac.ir

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1401.11.47.2.1]

شاخص سطح برگ، محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی، تعادل هورمونی و میزان تنفس گیاه می‌شود (Hura *et al*., 2015).

افزایش شدت و مدت زمان تنش خشکی باعث ایجاد مکانیسم‌های سازگاری شامل کاهش نسبت شاخه به ریشه، تغییرات دیواره سلولی، تنظیم اسمزی، فعال‌شدن سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدان و برنامه‌ریزی مجدد متابولیسم در گیاهان می‌شود (Blum, 2017). تنش خشکی با افزایش تجمع گونه‌های فعال اکسیژن، باعث القای تنش اکسیداتیو در گیاهان می‌شود که می‌توانند به ماکرومولکول‌های مهم سلولی مانند پروتئین‌ها، لیپیدها و DNA آسیب برسانند و حتی منجر به مرگ برنامه‌ریزی‌شده سلول شوند (Takahashi *et al*., 2020). در مقابل، گیاهان مکانیسم‌های دفاعی دارند که تحمل و سازگاری آنها را تحت تنش اکسیداتیو القاشده توسط تنش خشکی افزایش می‌دهد. سیستم دفاعی گیاهان که در مهار تنش اکسیداتیو نقش دارند شامل آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، سیستم گلی‌اکسالاز و چرخه آسکوربیک اسید-گلوتاتیون هستند (Boaretto *et al*., 2014; Ghorbani *et al*., 2021). متیل گلی‌اکسال ترکیب سمی بسیار واکنش‌پذیر، به‌عنوان محصول فرعی، در چندین مسیر متابولیکی مانند گلیکولیز تولید می‌شود. متیل گلی‌اکسال توسط سیستم گلی‌اکسالاز متشکل از دو آنزیم گلی‌اکسالاز I و II و با مصرف گلوتاتیون احیاشده به‌عنوان کوفاکتور و تبدیل به D-لاکتات سمیت‌زدایی می‌شود (Yadav *et al*., 2005; Ghorbani *et al*., 2020).

اسید سالیسیلیک به‌عنوان تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی مهم، تأثیرات مختلفی بر روی فرآیندهای مهم گیاه از جمله جذب یون، فرآیند گلدهی، عملکرد دستگاه فتوسنتزی، فعالیت سیستم دفاعی و همچنین تحمل گیاه به تنش‌های زیستی و غیرزیستی دارد (Gerami *et al*., 2018; Koo *et al*., 2020; Ramezani *et al*., 2021). عوامل متعددی مانند غلظت اسید سالیسیلیک، سطح اسید سالیسیلیک داخلی گیاه، نحوه کاربرد خارجی اسید سالیسیلیک، مرحله نموی گیاه و گونه گیاهی بر روی اثرات کاربرد خارجی اسید سالیسیلیک تأثیر می‌گذارند (Horvath *et al*., 2007). در گزارشی نشان داده شد که کاربرد خارجی اسید سالیسیلیک باعث افزایش تولید زیست‌توده، رنگیزه‌های فتوسنتزی، شاخص پایداری غشاء و کاهش نشت یونی در گیاه دارویی شنبلیله تحت تنش خشکی شد (Touhidi Nejad *et al*., 2016). کاربرد اسید سالیسیلیک همچنین باعث بهبود شاخص پایداری غشا، عملکرد دستگاه فتوسنتزی، پتانسیل آب برگ و فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز، پراکسیداز، کربنیک آنیدراز و نیترات ردوکتاز در گیاه گوجه فرنگی در شرایط تنش خشکی شد (Hayat *et al*., 2008). اثرات مثبت تیمار اسید سالیسیلیک بر رشد و عملکرد گیاهان دارویی رزماری و به‌لیمو تحت تنش خشکی نیز گزارش شده است (Dianat *et al*., 2016; Abbaszadeh *et al*., 2020). اگر چه نقش هورمون‌های گیاهی در پاسخ گیاهان به تنش‌های مختلف زیستی و غیرزیستی پذیرفته شده است (Ghorbani *et al*., 2022)، با این‌حال، مکانیسم دقیق فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی اسید سالیسیلیک در تحمل گیاهان به تنش خشکی به خوبی درک نشده است.

خرفه (*Portulaca oleracea* L.) گیاه دارویی از تیره Portulacaceae است که در سرتاسر نواحی معتدل و گرمسیر دنیا انتشار یافته است. گیاه غنی از اسیدهای چرب، پروتئین و ویتامین C، A و E است که حدود ۷۰ درصد اسیدهای چرب تشکیل‌دهنده روغن آن غیراشباع بوده و حدود ۵۰ درصد آن را تنها اسید چرب امگا ۳ تشکیل می‌دهد (Iranshahy *et al*., 2017). بنابراین، در تحقیق حاضر از گیاه دارویی خرفه برای شناخت مکانیسم‌های فیزیولوژیکی و شیمیایی القاشده توسط اسید سالیسیلیک در تحمل گیاه به تنش خشکی مورد استفاده قرار گرفته است. بنابراین، در این مطالعه، تأثیر سطوح مختلف خشکی و محلول‌پاشی برگی اسید سالیسیلیک بر رشد، متابولیسم کلروفیل و پرولین، چرخه آسکوربیک اسید گلوتاتیون و سیستم گلی‌اگزالات گیاه خرفه مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

کشت گیاه و اعمال تیمار: قبل از کاشت، بذرهای گیاه خرفه به‌مدت سه دقیقه در محلول هیپوکلرید سدیم ۵ درصد

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1401.11.47.2.1]

ضدعفونی و بلافاصله پنج بار با آب‌مقطر کاملاً شستشو شدند (Ghorbani *et al.*, 2019b). بذرهای ضدعفونی‌شده در گلدان‌های پلاستیکی (۱۰ سانتیمتر قطر و ۱۵ سانتیمتر عمق) حاوی هوموس، خاک رس و شن اتوکلاو شده به نسبت ۲:۱:۳ کاشته شدند (پنج بذر برای هر گلدان). گلدان‌ها در شرایط گلخانه‌ای و دمای روز / شب ۱۸/۲۵ درجه سانتی‌گراد، مدت روشنایی ۱۴ ساعت با شدت نور ۴۰۰ وات بر متر مربع و رطوبت نسبی ۵ ± ۶۵ درصد نگهداری شدند. گیاهچه‌های هر گلدان بعد از جوانه‌زنی به یک گیاهچه کاهش یافت. تنش خشکی ۳۰ روز بعد از جوانه‌زنی در سه سطح شاهد (۹۰ درصد ظرفیت زراعی)، تنش متوسط (۶۰ درصد ظرفیت زراعی) و تنش شدید (۳۰ درصد ظرفیت زراعی) اعمال شد. بعد از محاسبه ظرفیت زراعی گلدان‌ها و تعیین میزان آب مورد نیاز برای هر گلدان، سطح رطوبت گلدان‌ها روزانه با وزن گلدان‌ها کنترل شده و مقدار آب از دست‌رفته بر اثر تبخیر خاک و تعرق گیاه برای هر تیمار جایگزین شد. محلول‌پاشی برگی سالیسیلیک اسید در دو سطح (۰/۵ و ۱ میلی‌مولار) در دو مرحله، مرحله اول قبل از اعمال تنش خشکی و مرحله دوم هفت روز بعد از اعمال تنش خشکی، انجام شد. غلظت‌های اسید سالیسیلیک براساس مطالعات انجام‌شده توسط Kabiri و همکاران (۲۰۱۴) و Estaji و Niknam (۲۰۲۰) انتخاب شدند. برای گیاهان شاهد (بدون دریافت سالیسیلیک اسید) از حجم مشابه آب‌مقطر برای محلول‌پاشی استفاده شد. پس از ۱۵ روز اعمال تنش خشکی، گیاهچه‌های خرفه (۴۵ روزه) برداشت و بعد از اندازه‌گیری صفات مورفولوژیکی، در دمای ۸۰- درجه سانتی‌گراد برای بررسی‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی نگهداری شدند (Ghorbani *et al.*, 2019a).

رنگیزه‌های فتوسنتزی و فلورسانس کلروفیل: محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی با استفاده از هموژن‌کردن نمونه‌های برگ (۰/۲۵ گرم) با استون ۸۰ درصد و سپس سانتریفیوژ در ۱۰۰۰۰ دور به‌مدت ۱۰ دقیقه تعیین شد. جذب محلول رویی در طول موج‌های ۴۷۰، ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر با استفاده از اسپکتوفتومتر (Carry 300; Varian, Walnut Creek, CA, USA) اندازه‌گیری شد و محتوای رنگیزه‌های کلروفیل *a*، *b* و کاروتنوئیدها مطابق روش Lichtenthaler (۱۹۸۷) محاسبه گردید. برای اندازه‌گیری فلورسانس کلروفیل، از انتهایی‌ترین برگ کاملاً توسعه‌یافته استفاده شد. این کار با استفاده از دستگاه فلوریمتر (PAM 2500-Walz Germany) انجام شد. با استفاده از گیره‌های مخصوص (2030-B, Walz)، برگ گیاهان به‌مدت ۳۰ دقیقه با تاریکی سازگار شده و سپس میزان فلورسانس تیمارها اندازه‌گیری شد.

محتوای نسبی آب برگ، نشت یونی و شاخص پایداری: برای محاسبه محتوای نسبی آب، برگ سوم گیاه بلافاصله بعد از برداشت وزن (W1) و به‌مدت ۵ ساعت در آب‌مقطر و تاریکی قرار داده شد و دوباره وزن گردید (W2). سپس به‌مدت ۲۴ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد قرار داده شد و وزن شد (W3). محتوای نسبی آب برگ براساس رابطه ۱ محاسبه شد (Smart and Bingham, 1974).

رابطه ۱:

$$RWC = (W1-W2) / (W2-W3) \times 100$$

برای اندازه‌گیری نشت یونی، ابتدا ۰/۱ گرم از برگ در ۱۰ میلی‌لیتر آب‌مقطر قرار گرفته و به‌مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق روی شیکر با سرعت ۱۰۰ دور در دقیقه نگهداری شدند و سپس هدایت الکتریکی محلول به‌وسیله EC متر (مدل Metrohm 644) ثبت گردید (EC1). سپس نمونه‌ها به‌مدت ۲۰ دقیقه در اتوکلاو با دمای ۱۲۰ درجه سانتیگراد قرار داده شدند و بعد از خنک‌شدن هدایت الکتریکی آنها (EC2) خوانده شد. با استفاده از رابطه ۲ میزان نشت یونی محاسبه گردید (Lutts *et al.*, 1995).

رابطه ۲

$$\text{نشت یونی} = (EC1/EC2) \times 100$$

شاخص پایداری غشا نیز با استفاده از پارامترهای اندازه‌گیری‌شده در نشت یونی و مطابق رابطه ۳ محاسبه گردید:

رابطه ۳

$$\text{شاخص پایداری غشا} = 1 - (EC1/EC2) \times 100$$

محتوای پرولین: برای اندازه‌گیری محتوای پرولین آزاد از

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1401.11.47.2.1]

عصاره متانولی برگ‌ها استفاده شد. پرولین با خواندن جذب واکنش نین‌هیدرین در طول‌موج ۵۱۵ نانومتر با اسپکتوفتومتر (Carry 300; Varian, Walnut Creek, CA, USA) مطابق روش Bates و همکاران (۱۹۷۳) محاسبه شد.

محتوای مالون دی‌آلدئید و متیل گلی‌اکسال: محتوای مالون دی‌آلدئید (MDA) برگ‌ها با استفاده از روش تیوباربیتوریک اسید مطابق روش Heath و Packer (۱۹۶۸) و ضریب خاموشی $155\ mM^{-1}cm^{-1}$ اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری متیل گلی‌اکسال، بعد از هموژن‌کردن برگ‌های تازه با استفاده از پرکلروریک اسید (۵ درصد)، با سرعت ۱۲۰۰۰ دور در دقیقه به‌مدت ۲۰ دقیقه سانتریفیوژ شدند. بعد از خنثی‌سازی محلول رویی با کربنات سدیم، ترکیبات N-استیل سیستئین و مونو سدیم فسفات به محلول اضافه شد و جذب آن در طول‌موج ۲۸۸ نانومتر با استفاده از اسپکتوفتومتر (Carry 300; Varian, Walnut Creek, CA, USA) خوانده شد (Wild *et al.*, 2012).

عصاره آنزیمی و سنجش فعالیت آنزیم‌ها: بافت تازه برگ (۰/۵ گرم) در یک میلی‌لیتر از بافر پتاسیم-فسفات ۵۰ میلی‌مولار (pH=۷) شامل کلرید پتاسیم ۱۰۰ میلی‌مولار، آسکوربات ۱ میلی‌مولار، بتا- مرکاپتواتانول ۵ میلی‌مولار و گلیسرول ۱۰ درصد هموژن شد. از محلول رویی بعد از سانتریفیوژ در ۱۲۰۰۰ دور در دقیقه به‌مدت ۱۰ دقیقه برای تعیین فعالیت آنزیم‌ها استفاده شد (Ghorbani *et al.*, 2018b).

فعالیت آنزیم گلی‌اکسالاز I (EC 4.4.1.5) با خواندن میزان افزایش در جذب طول‌موج ۲۴۰ نانومتر و محلول واکنش شامل بافر پتاسیم فسفات ۱۰۰ میلی‌مولار (pH=۷)، سولفات منیزیم ۱۵ میلی‌مولار، گلوتاتیون ۱/۷ میلی‌مولار، متیل گلی‌اکسال ۳/۵ میلی‌مولار در حجم نهایی ۷۰۰ میکرولیتر مطابق روش حسنوزمان و همکاران (۲۰۱۱) محاسبه گردید. با استفاده از روش Principato و همکاران (۱۹۸۷)، فعالیت آنزیم گلی‌اکسالاز II (EC 3.1.2.6) اندازه‌گیری شد. محلول واکنش شامل بافر Tris-HCl ۱۰۰ میلی‌مولار (pH=۷/۲)، ۵،۵'-۲-نیتروبنزوئیک اسید ۰/۲ میلی‌مولار و D-S-لاکتوگلوتاتیون ۱ میلی‌مولار در حجم نهایی ۱ میلی‌لیتر است. فعالیت آنزیم دلتا-آمینولوولینیک اسید دهیدراتاز (EC 4.2.1.24) مطابق روش Jain و Gadre (۲۰۰۴) و اندازه‌گیری میزان تفاوت در غلظت پورفوبیلونوژن در ۱۵ دقیقه در طول‌موج ۵۵۳ نانومتر محاسبه گردید. فعالیت آنزیم پرولین دهیدروژناز (EC 1.5.5.2) با خواندن محلول واکنش شامل بافر $NaCO_3$-HCl ۰/۱۵ میلی‌مولار (pH=۱۰/۳)، L-پرولین ۱۵ میلی‌مولار، NAD^+ ۱/۵ میلی‌مولار و عصاره آنزیمی در طول‌موج ۳۴۰ نانومتر مطابق روش Charest و Phan (۱۹۹۰) محاسبه گردید. فعالیت آنزیم دلتا -۱-پرولین-۵-کربوکسیلات سنتتاز (EC 2.7.2.11) با خواندن محلول واکنش شامل بافر Tris–HCl ۱۰۰ میلی‌مولار (pH=۷/۲)، عصاره آنزیمی، دی‌کلرید منیزیم ۲۵ میلی‌مولار، گلوتامات سدیم ۷۵ میلی‌مولار، ATP ۵ میلی‌مولار و NADPH ۰/۴ میلی‌مولار در طول‌موج ۳۴۰ نانومتر مطابق روش Sumithra و همکاران (۲۰۰۶) محاسبه گردید. با اندازه‌گیری افزایش در جذب ۶۶۷ نانومتر حاصل از تشکلیل کلروفیلید، فعالیت آنزیم کلروفیلاز مطابق روش Costa و همکاران (۲۰۰۵) بدست آمدند.

این آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار انجام شد. تجزیه واریانس داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹,۱,۳ و مقایسه میانگین صفات توسط آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح پنج درصد انجام شد و رسم نمودارها با نرم‌افزار Excel صورت گرفت (Ghorbani *et al.*, 2009).

نتایج

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر ساده تنش خشکی و اسید سالیسیلیک بر دو صفت ارتفاع و وزن خشک کل و اثر متقابل تنش خشکی و اسید سالیسیلیک بر ارتفاع گیاه در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که افزایش تنش خشکی باعث کاهش معنی‌دار ارتفاع گیاه نسبت به شاهد شد. کاهش ۱۸/۵ و ۴۵ درصدی در ارتفاع گیاه به‌ترتیب تحت تیمار خشکی ۶۰ و ۳۰ درصد ظرفیت زراعی نسبت به شاهد مشاهده شد. با این‌حال، در هر دو سطح تنش

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1401.11.47.2.1]

جدول ۱- تجزیه واریانس صفات مورفولوژی و رنگیزه‌های فتوسنتزی در گیاه خرفه تحت تنش خشکی و محلول‌پاشی برگی اسید سالیسیلیک

منابع تغییر	df	ارتفاع	وزن خشک کل	کلروفیل a	کلروفیل b	کاروتنوئیدها	فلورسانس کلروفیل
تنش خشکی	۲	۳۶۹**	۰/۷**	۰/۲**	۰/۰۲**	۰/۰۸**	۰/۰۷**
سالیسیلیک اسید	۲	۱۳**	۰/۰۸**	۰/۰۲**	۰/۰۰۴**	۰/۰۱**	۰/۰۱**
تنش خشکی × سالیسیلیک اسید	۴	۸**	۰/۰۲^{ns}	۰/۰۰۵*	۰/۰۰۰۹**	۰/۰۰۰۶^{ns}	۰/۰۰۴**
خطا	۱۸	۰/۶	۰/۰۰۷	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۲	۵/۲	۰/۰۰۰۱
ضریب تغییرات (٪)		۳/۳	۹/۸	۴/۵	۶/۱	۵/۲	۲/۱

*** و ** به‌ترتیب معنی‌داری در سطح پنج و یک درصد، ns عدم اختلاف معنی‌دار**

جدول ۲- مقایسه میانگین صفات مورفولوژی و رنگیزه‌های فتوسنتزی گیاه خرفه تحت تیمار خشکی (۹۰، ۶۰ و ۳۰ درصد ظرفیت زراعی (FC)) و محلول‌پاشی برگی سالیسیلیک اسید (صفر، ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار)

تنش خشکی	اسید سالیسیلیک (میلی‌مولار)	ارتفاع (سانتیمتر)	وزن خشک کل (گرم)	کلروفیل a (میلی‌گرم بر گرم وزن تر)	کلروفیل b	کاروتنوئیدها	فلورسانس کلروفیل
FC ٪۹۰	۰	۳۴/۹۳±۰/۷۵^{a}	۱/۱۶±۰/۰۹^{a}	۰/۸۸۸±۰/۰۳۳^{a}	۰/۲۷۱±۰/۰۱۵^{a}	۰/۴۲۳±۰/۰۳۰^{b}	۰/۶۹۳±۰/۰۱۲^{a}
	۰/۵	۳۴/۴۷±۰/۸۵^{ab}	۱/۱۹±۰/۱۱^{a}	۰/۸۸۹±۰/۰۴۰^{a}	۰/۲۷۲±۰/۰۱۷^{a}	۰/۴۵۷±۰/۰۲۰^{a}	۰/۶۷۶±۰/۰۱۰^{a}
	۱	۳۳/۶۰±۱/۱۱^{b}	۱/۱۵±۰/۱۲^{a}	۰/۸۸۰±۰/۰۳۷^{a}	۰/۲۷۲±۰/۰۲۰^{a}	۰/۴۶۲±۰/۰۲۰^{a}	۰/۶۸۳±۰/۰۱۲^{a}
FC ٪۶۰	۰	۲۸/۴۶±۰/۷۷^{d}	۰/۶۶±۰/۰۵^{c}	۰/۶۷۸±۰/۰۳۳^{c}	۰/۲۰۶±۰/۰۱۴^{b}	۰/۳۱۳±۰/۰۲۶^{d}	۰/۵۲۷±۰/۰۱۲^{e}
	۰/۵	۳۱/۳۰±۰/۶۶^{c}	۰/۹۳±۰/۰۸^{b}	۰/۷۸۷±۰/۰۳۷^{b}	۰/۲۵۲±۰/۰۰۹^{a}	۰/۳۸۹±۰/۰۱۰^{c}	۰/۶۰۰±۰/۰۱۲^{c}
	۱	۳۱/۶۳±۰/۵۲^{c}	۰/۹۳±۰/۱۱^{b}	۰/۷۹۰±۰/۰۳۸^{b}	۰/۲۵۳±۰/۰۱۲^{a}	۰/۳۹۶±۰/۰۱۳^{bc}	۰/۶۲۰±۰/۰۱۳^{b}
FC ٪۳۰	۰	۱۹/۲۱±۰/۸۰^{g}	۰/۴۸±۰/۰۴^{d}	۰/۵۰۳±۰/۰۱۸^{e}	۰/۱۴۲±۰/۰۱۲^{c}	۰/۲۰۷±۰/۰۱۵^{c}	۰/۴۳۸±۰/۰۱۲^{f}
	۰/۵	۲۲/۲۰±۰/۷۵^{f}	۰/۶۶±۰/۰۷^{c}	۰/۶۱۵±۰/۰۲۹^{d}	۰/۱۸۵±۰/۰۱۲^{b}	۰/۲۸۲±۰/۰۰۸^{d}	۰/۵۳۵±۰/۰۰۸^{de}
	۱	۲۴/۰۵±۰/۴۵^{e}	۰/۷۲±۰/۰۹^{c}	۰/۶۱۸±۰/۰۳۱^{d}	۰/۲۰۷±۰/۰۱۳^{b}	۰/۲۸۳±۰/۰۱۴^{d}	۰/۵۵۲±۰/۰۱۱^{d}

مقادیر با حروف یکسان در هر ستون، فاقد اختلاف معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد براساس آزمون LSD هستند.

خشکی، محلول‌پاشی برگی اسید سالیسیلیک به‌طور معنی‌داری باعث بهبود ارتفاع گیاه شد و تحت غلظت بالای اسید سالیسیلیک (۱ مولار)، ارتفاع گیاه افزایش بیشتری نشان داد (جدول ۲). وزن خشک کل گیاه خرفه تحت تنش خشکی ۶۰ و ۳۰ درصد ظرفیت زراعی نسبت به تیمار شاهد به‌ترتیب به میزان ۴۳/۱ و ۵۸/۶ درصد کاهش یافت، درحالی‌که، اسید سالیسیلیک به‌طور معنی‌داری باعث افزایش زیست‌توده گیاه در هر دو سطح تنش خشکی شد. با این‌حال تفاوت معنی‌داری بین دو غلظت اسید سالیسیلیک مشاهده نشد (جدول ۲).

اثرات ساده تنش خشکی و اسید سالیسیلیک بر محتوای کلروفیل *a*، *b*، کاروتنوئیدها و فلورسانس کلروفیل در سطح یک درصد و اثر متقابل خشکی و اسید سالیسیلیک بر کلروفیل *b* و فلورسانس کلروفیل در سطح یک درصد و بر محتوای کلروفیل *a* در سطح پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). نتایج مقایسه میانگین روند کاهشی در محتوای کلروفیل *a* و *b* با افزایش تنش خشکی نشان داد که بیشترین کاهش تحت تنش خشکی ۳۰ درصد ظرفیت زراعی به میزان ۴۳/۴ و ۴۷/۶ درصد به‌ترتیب در محتوای کلروفیل *a* و *b* مشاهده گردید. کاربرد خارجی اسید سالیسیلیک در تنش خشکی به‌طور معنی‌داری باعث افزایش محتوای کلروفیل *a* و *b* نسبت به تیمارهای

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-28]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1401.11.47.2.1]

جدول ۳- تجزیه واریانس صفات محتوای آب نسبی، نشت یونی، شاخص پایداری غشا، مالون دی‌آلدئید، متیل گلی‌اکسال و پرولین در گیاه خرفه تحت تنش خشکی و محلول‌پاشی برگی اسید سالیسیلیک

	df	محتوای آب نسبی	نشت یونی	شاخص پایداری غشا	مالون دی‌آلدئید	متیل گلی‌اکسال	پرولین
تنش خشکی	۲	۱۴۹۳**	۱۶۷۹**	۱۶۷۲**	۲۶**	۱۳۶**	۳۲۵**
سالیسیلیک اسید	۲	۲۱۶**	۳۷۹**	۳۷۶**	۳/۸**	۳۱**	۴۷**
تنش خشکی × سالیسیلیک اسید	۴	۶۶**	۱۱۷**	۱۲۲**	۱**	۹**	۵**
خطا	۱۸	۳/۵	۳/۹	۳/۷	۰/۰۶	۰/۲	۰/۲
ضریب تغییرات (٪)		۳/۲	۳/۸	۴	۴/۳	۲/۹	۴/۳

** معنی‌داری در سطح یک درصد

خشکی به تنهایی شد، هر چند تفاوت معنی‌داری بین دو غلظت اسید سالیسیلیک مشاهده نشد (جدول ۲). تنش خشکی ۶۰ و ۳۰ درصد ظرفیت زراعی باعث کاهش محتوای کاروتنوئیدها به‌ترتیب به میزان ۲۶ و ۵۱/۱ درصد نسبت به شاهد شد، با این‌حال، محلول‌پاشی برگی اسید سالیسیلیک باعث بهبود محتوای کاروتنوئیدها در هر دو سطح تنش خشکی شد (جدول ۲). فلورسانس کلروفیل نیز با افزایش تنش خشکی روند کاهشی نشان داد و بیشترین میزان کاهش تحت خشکی شدید مشاهده شد. با این‌حال، کاربرد اسید سالیسیلیک باعث افزایش فلورسانس کلروفیل تحت تنش خشکی شد (جدول ۲).

نتایج آنالیز واریانس نشان داد اثر تیمارهای خشکی و سالیسیلیک اسید و اثر متقابل آنها بر صفات محتوای آب نسبی برگ، نشت یونی، شاخص پایداری غشا، محتوای مالون دی‌آلدئید، متیل گلی‌اگسال و پرولین در سطح یک درصد معنی‌دار است (جدول ۳). نتایج نشان داد که تنش خشکی به‌طور معنی‌داری باعث کاهش محتوای آب نسبی برگ گیاه نسبت به شرایط بدون تنش شد به‌طوری‌که بیشترین کاهش تحت تنش خشکی شدید (۳۰ درصد ظرفیت زراعی) به میزان ۴۴/۲ درصد مشاهده شد. با این‌حال، محلول‌پاشی برگی سالیسیلیک اسید باعث بهبود محتوای آب نسبی برگ در هر دو سطح خشکی شد و بیشترین افزایش با محلول‌پاشی ۱ میلی‌مولار بدست آمد (جدول ۴). تنش خشکی ۶۰ و ۳۰ درصد ظرفیت زراعی باعث افزایش نشت یونی به‌ترتیب به میزان ۶۶ و ۱۰۷/۷ درصد نسبت به گیاهان بدون تنش شد. با این‌حال، کاربرد سالیسیلیک اسید به‌طور معنی‌داری باعث کاهش نشت یونی در هر دو سطح خشکی شد (جدول ۴). روند کاهشی در شاخص پایداری غشا گیاه خرفه با افزایش تنش خشکی مشاهده شد و بیشترین کاهش تحت تیمار ۳۰ درصد ظرفیت زراعی مشاهده شد. با این‌حال، محلول‌پاشی برگی ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید باعث افزایش شاخص پایداری غشا به‌ترتیب به میزان ۲۷/۳ و ۳۱/۳ درصد تحت تیمار ۶۰ درصد ظرفیت زراعی و ۸۲ و ۱۵/۷ درصد تحت تیمار ۳۰ درصد ظرفیت زراعی نسبت به تیمارهای خشکی به تنهایی شدند (جدول ۴).

روند افزایشی در محتوای مالون دی‌آلدئید و متیل گلی‌اکسال برگ‌های خرفه با افزایش سطح تنش خشکی مشاهده شد که بیشترین افزایش تحت خشکی ۳۰ درصد ظرفیت زراعی بود. با این‌حال، در هر دو سطح تنش خشکی، محلول‌پاشی برگی سالیسیلیک اسید باعث کاهش سطح محتوای مالون دی‌آلدئید و متیل گلی‌اکسال شد، هر چند بین دو غلظت سالیسیلیک اسید تفاوت معنی‌دار مشاهده نشد (بجز محتوای متیل گلی‌اکسال تحت خشکی ۳۰ درصد) (جدول ۴). تحت شرایط بدون خشکی، کاربرد برگی سالیسیلیک اسید باعث افزایش محتوای پرولین برگ شد. اعمال تنش خشکی باعث افزایش معنی‌دار محتوای پرولین برگ شد به‌طوری‌که

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1401.11.47.2.1]

جدول ۴- مقایسه میانگین صفات محتوای آب نسبی، نشت یونی، شاخص پایداری غشا، مالون دی‌آلدئید، متیل گلی‌اکسال و پرولین گیاه خرفه تحت تیمار خشکی (۹۰، ۶۰ و ۳۰ درصد ظرفیت زراعی (FC)) و سالیسیلیک اسید (صفر، ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار)

تنش خشکی	سالیسیلیک اسید (میلی‌مولار)	محتوای آب نسبی	نشت یونی	شاخص پایداری غشا	مالون دی‌آلدئید	متیل گلی‌اکسال	پرولین (میکرومول بر گرم وزن تر)
		(٪)			(میکرومول بر گرم وزن تر)		
FC ٪۹۰	۰	۸۰/۴ ±۲/۰^{a}	۳۷/۶ ±۲/۰^{d}	۶۲/۵ ± ۱/۷^{a}	۴/۲۷ ± ۰/۲۰^{e}	۱۰/۶±۰/۳۲^{f}	۱/۵۶±۰/۰۷۱^{g}
	۰/۵	۸۰/۹ ±۲/۳^{a}	۳۶/۶ ±۲/۲^{d}	۶۳/۰ ± ۲/۲^{a}	۴/۱۴ ± ۰/۲۱^{e}	۱۰/۵±۰/۳۵^{f}	۲/۴۸±۰/۲۷۰^{f}
	۱	۸۰/۲ ±۱/۷^{a}	۳۷/۱ ±۲/۱^{d}	۶۲/۷ ± ۲/۰^{a}	۴/۳۲ ± ۰/۲۰^{e}	۱۰/۵±۰/۳۸^{f}	۳/۴۹±۰/۳۲۸^{e}
FC ٪۶۰	۰	۶۲/۸ ±۱/۸^{d}	۶۲/۴ ±۲/۰^{b}	۳۷/۴ ± ۱/۸^{c}	۶/۵۷ ± ۰/۲۲^{c}	۱۸/۱±۰/۴۴^{b}	۹/۰۳±۰/۲۸۲^{d}
	۰/۵	۶۸/۰ ±۱/۷^{c}	۵۲/۱ ±۱/۸^{c}	۴۷/۶ ± ۱/۵^{b}	۵/۳۳ ± ۰/۲۱^{d}	۱۴/۹±۰/۲۳^{de}	۱۳/۶۳±۰/۵۷۰^{b}
	۱	۷۴/۲ ±۱/۷^{b}	۵۰/۷ ±۱/۹^{c}	۴۹/۱ ± ۱/۹^{b}	۵/۳۴ ± ۰/۲۸^{d}	۱۴/۲±۰/۳۳^{e}	۱۵/۵۰±۰/۵۶۹^{a}
FC ٪۳۰	۰	۴۴/۹ ±۲/۱^{f}	۷۸/۱ ±۱/۵^{a}	۲۱/۷ ± ۱/۵^{d}	۹/۰۲ ± ۰/۳۲^{a}	۲۲/۱±۰/۵۸^{a}	۱۰/۱۸±۰/۲۸۶^{c}
	۰/۵	۵۶/۴ ±۱/۶^{e}	۶۰/۱ ±۲/۲^{b}	۳۹/۵ ± ۲/۰^{c}	۷/۱۰ ± ۰/۲۳^{b}	۱۶/۶±۰/۵۶^{c}	۱۳/۸۸±۰/۳۷۵^{b}
	۱	۶۳/۰ ±۱/۸^{d}	۵۳/۴± ۲/۱^{c}	۴۶/۸ ± ۲/۵^{b}	۶/۷۴ ± ۰/۳۵^{bc}	۱۵/۶±۰/۵۳^{d}	۱۵/۲۲±۰/۵۷۹^{a}

مقادیر با حروف کوچک یکسان در هر ستون، فاقد اختلاف معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد براساس آزمون LSD هستند.

بیشترین افزایش تحت تنش خشکی شدید به میزان ۶/۵ برابر نسبت به تیمار بدون تنش خشکی شد. در هر دو سطح تنش خشکی، کاربرد برگی سلیسیلیک اسید به‌طور معنی‌داری باعث افزایش محتوای پرولین نسبت به تیمارهای خشکی به تنهایی شد و بیشترین افزایش تحت غلظت بالای سالیسیلیک اسید مشاهده شد (جدول ۲).

نتایج آنالیز واریانس نشان داد اثر تیمار خشکی، سالیسیلیک اسید و اثر متقابل تیمارها بر فعالیت آنزیم‌های کلروفیلاز، دلتا-آمینولوولینیک اسید دهیدراتاز، پرولین دهیدروژناز، دلتا-۱-پرولین-۵-کربوکسیلات سنتتاز ۱، گلی‌اکسالاز I و II در سطح یک درصد معنی‌دار بودند (جدول ۵). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که روند افزایش در فعالیت آنزیم کلروفیلاز با افزایش سطح تنش خشکی مشاهده شد و بیشترین میزان فعالیت آنزیم کلروفیلاز تحت خشکی ۳۰ درصد ظرفیت زراعی ثبت شد. با این‌حال، در هر دو سطح تنش خشکی، کاربرد برگی سالیسیلیک اسید باعث کاش فعالیت آنزیم کلروفیلاز شد. در سطح ۶۰ درصد ظرفیت زراعی، بیشترین کاهش تحت تیمار سالیسیلیک اسید ۱ میلی‌مولار مشاهده شد اما در خشکی ۳۰ درصد ظرفیت زراعی، تفاوت معنی‌داری بین دو سطح سالیسیلیک اسید مشاهده نشد (شکل 1A). تنش خشکی باعث کاهش فعالیت آنزیم دلتا-آمینولوولینیک اسید دهیدراتاز نسبت به تیمار شاهد شد به‌طوری‌که بیشترین میزان کاهش تحت تنش خشکی شدید به میزان ۴۱/۳ درصد نسبت به تیمار شاهد مشاهده شد. کاربرد سالیسیلیک اسید باعث بهبود فعالیت آنزیم دلتا-آمینولوولینیک اسید دهیدراتاز در برگ گیاهان خرفه تحت تنش خشکی شد که بیشترین افزایش تحت تیمار ۱ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید بدست آمد (شکل 1B). فعالیت آنزیم پرولین دهیدروژناز افزایش ۱۱/۴ و ۳۰/۴ درصدی به‌ترتیب تحت تنش خشکی ۶۰ و ۳۰ درصد ظرفیت زراعی نسبت به تیمار شاهد نشان داد. محلول‌پاشی برگی سالیسیلیک اسید باعث افزایش بیشتر فعالیت آنزیم پرولین دهیدروژناز در هر دو سطح تنش خشکی نسبت به تنش خشکی به تنهایی شد. تحت خشکی ۶۰ درصد تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای سالیسیلیک اسید ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار مشاهده نشد اما تحت خشکی ۳۰ درصد ظرفیت زراعی، بیشترین افزایش تحت تیمار ۱ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک بدست آمد (شکل 1C). تنش خشکی باعث

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1401.11.47.2.1]

جدول ۵- تجزیه واریانس آنزیم‌های کلروفیلاز، دلتا-آمینولوولینیک اسید دهیدراتاز، پرولین دهیدروژناز، دلتا-۱-پرولین-۵-کربوکسیلات سنتتاز، گلی اکسالاز I و II در گیاه خرفه تحت تنش خشکی و محلول‌پاشی برگی اسید سالیسیلیک

	df	کلروفیلاز	دلتا-آمینولوولینیک اسید دهیدراتاز	پرولین دهیدروژناز	دلتا-۱-پرولین-۵-کربوکسیلات سنتتاز ۱	گلی اکسالاز I	گلی اکسالاز II
تنش خشکی	۲	۲۱۰**	۲۷۶۸**	۱۵**	۶/۳**	۰/۲**	۰/۱**
سالیسیلیک اسید	۲	۴۸**	۳۳۳**	۰/۷**	۰/۷**	۰/۰۲**	۰/۰۱**
تنش خشکی × سالیسیلیک اسید	۴	۱۴**	۱۰۰**	۰/۳*	۰/۳**	۰/۰۰۵**	۰/۰۰۴**
خطا	۱۸	۰/۱۶	۱/۱	۰/۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۰۵
ضریب تغییرات		۳	۲/۹	۳/۴	۳/۸	۵/۴	۶/۶

*** و ** به‌ترتیب معنی‌داری در سطح پنج و یک درصد**

افزایش معنی‌دار فعالیت آنزیم پرولین دهیدروژناز نسبت به تیمار شاهد شد که کاربرد برگی اسید سالیسیلیک باعث افزایش بیشتر فعالیت آنزیم نسبت به تیمار خشکی به تنهایی شد. در هر دو سطح تنش خشکی، تیمار ۱ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک باعث افزایش بیشتر فعالیت آنزیم شد (شکل 1D). تنش خشکی همچنین باعث افزایش فعالیت دو آنزیم گلی‌اکسالاز I و II در برگ گیاهان خرفه نسبت به تیمار شاهد شد. بیشترین افزایش در فعالیت دو آنزیم گلی‌اکسالاز I و II به‌ترتیب تحت خشکی ۳۰ و ۶۰ درصد ظرفیت زراعی ثبت گردید. محلول‌پاشی برگی اسید سالیسیلیک باعث افزایش بیشتر فعالیت هر دو آنزیم گلی‌اکسالاز I و II در هر دو سطح تنش خشکی شد، هر چند تفاوت معنی‌داری بین دو سطح سالیسیلیک اسید مشاهده نشد (شکل E و 1F).

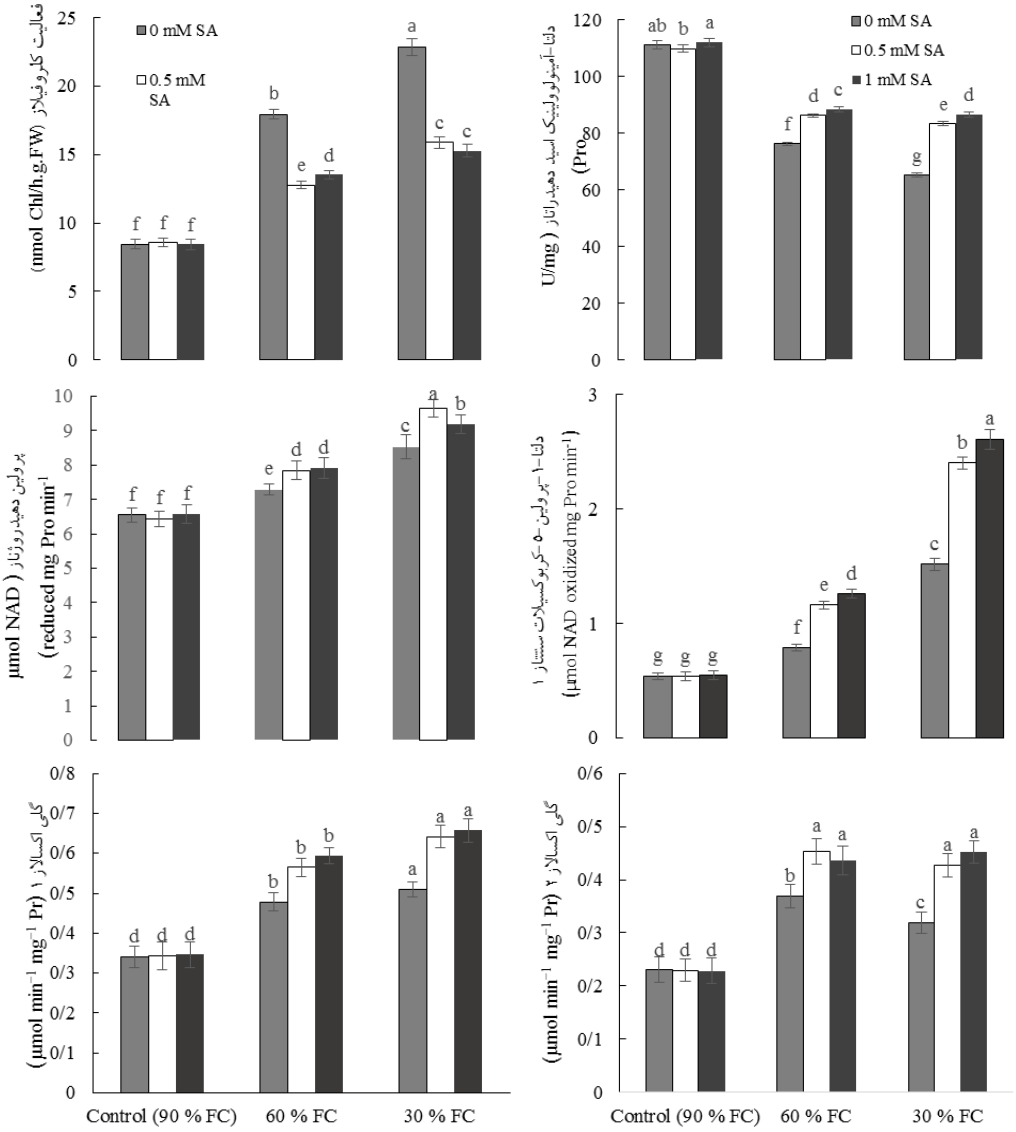
تجزیه واریانس نشان داد اثر تیمار خشکی، اسید سالیسیلیک و اثر متقابل آنها بر محتوای آسکوربیک اسید احیاشده و اکسیدشده، گلوتاتیون احیاشده و اکسیدشده و همچنین، نسبت آسکوربیک اسید احیاشده به اکسیدشده و گلوتاتیون احیاشده به اکسیدشده در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۶). تنش خشکی ۶۰ و ۳۰ درصد ظرفیت زراعی باعث کاهش محتوای آسکوربیک اسید احیاشده به‌ترتیب به میزان ۳۰/۸ و ۴۳/۷ درصد و افزایش آسکوربیک اسید احیاشده به میزان ۵۵/۲ و ۸۴/۵ درصد نسبت به تیمار شاهد شد. با این حال، محلول‌پاشی برگی اسید سالیسیلیک باعث افزایش محتوای آسکوربیک اسید احیاشده و کاهش سطح آسکوربیک اسید اکسیدشده در هر دو سطح خشکی نسبت به تیمار خشکی به تنهایی شد، هر چند تفاوت معنی‌داری بین دو سطح اسید سالیسیلیک مشاهده نشد (شکل A و 2B). یک روند کاهش با افزایش سطح خشکی در محتوای گلوتاتیون احیاشده برگ گیاه خرفه نسبت به تیمار شاهد مشاهده شد که کاربرد برگی اسید سالیسیلیک باعث افزایش گلوتاتیون احیاشده در هر دو سطح برگ شد اما تفاوت معنی‌داری بین دو سطح اسید سالیسیلیک مشاهده نشد (شکل 2C). برخلاف گلوتاتیون احیا شده، تنش خشکی باعث افزایش گلوتاتیون اکسیدشده در برگ شد که بیشترین افزایش تحت تنش شدید خشکی بدست آمد. با این‌حال، اسید سالیسیلیک باعث کاهش گلوتاتیون اکسید شده در هر دو سطح تنش خشکی نسبت به تیمار خشکی به تنهایی شد (شکل D ۲). تنش خشکی همچنین باعث کاهش نسبت‌های آسکوربیک اسید احیاشده به اکسیدشده و گلوتاتیون احیاشده به اکسیدشده نسبت به تیمار شاهد شد که کمترین میزان این نسبت‌ها تحت خشکی شدید مشاهده شد. با این حال، تیمار اسید سالیسیلیک در هر دو سطح تنش خشکی باعث بهبود نسبت-های آسکوربیک اسید احیاشده به اکسید شده و گلوتاتیون احیا-شده به اکسیدشده در برگ گیاه خرفه شد (شکل E و 2F).

بحث

تنش خشکی باعث کاهش جذب آب، پتانسیل آب و فشار

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1401.11.47.2.1]



شکل ۱- تأثیر کاربرد برگی اسید سالیسیلیک (صفر، ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار (SA)) بر فعالیت آنزیم‌های کلروفیلاز (A)، دلتا-آمینولوولینیک اسید دهیدراتاز (B)، پرولین دهیدروژناز (C)، دلتا-۱-پرولین-۵-کربوکسیلات سنتتاز ۱ (D)، گلی اکسالاز I (E) و II (F) در برگ گیاه خرفه تحت تنش خشکی (۹۰، ۶۰ و ۳۰ درصد ظرفیت زراعی (FC)). میانگین‌های دارای حروف مشترک براساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

تورگر سلول‌های گیاه می‌شود که منجر به بسته‌شدن روزنه، پژمردگی گیاه و کاهش رشد و توسعه سلولی و درنتیجه کاهش رشد و عملکرد گیاه می‌شود (Idrees *et al.*, 2010; Ghorbani *et al.*, 2011). نتایج تحقیق حاضر نشان داد که تنش خشکی تأثیر منفی بر رشد (ارتفاع و تولید زیست‌توده) گیاه خرفه داشت که مطابق نتایج گزارش شده توسط Khan و همکاران (۲۰۱۹) و Idrees و همکاران (۲۰۱۰) است. کاهش رشد و تولید زیست‌توده گیاهان خرفه تحت تنش خشکی می‌تواند نتیجه تأثیرات منفی تنش خشکی بر رشد و گسترش سلول‌های گیاهی ناشی از کاهش پتانسیل آب و فشار تورگور و همچنین افزایش پیری برگ‌ها باشد. تأثیر منفی تنش خشکی بر رشد گیاه دارویی رزماری نیز قبلا توسط Abbaszadeh و همکاران (۲۰۲۰) گزارش شده است. بنابراین، کاهش جذب آب ناشی از تنش خشکی باعث پیری برگ‌های بالغ، کاهش رشد سلولی

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-28]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1401.11.47.2.1]

جدول ۶- تجزیه واریانس آسکوربیک اسید احیاشده و اکسیدشده، گلوتاتیون احیاشده و اکسیدشده و نسبت‌های آسکوربیک اسید و گلوتاتیون احیاشده به اکسیدشده در گیاه خرفه تحت تنش خشکی و محلول‌پاشی برگی اسید سالیسیلیک

	df	آسکوربیک اسید احیا شده	آسکوربیک اسید اکسیدشده	نسبت آسکوربیک اسید احیاشده به اکسیدشده	گلوتاتیون احیاشده	گلوتاتیون اکسیدشده	نسبت گلوتاتیون احیا شده به اکسید شده
تنش خشکی	۲	۱۰**	۱۰**	۱**	۳۹۶**	۱۵۴**	۱/۷**
سالیسیلیک اسید	۲	۲**	۶/۶**	۰/۳**	۴۱**	۴۹**	۰/۲**
تنش خشکی×سالیسیلیک اسید	۴	۰/۵**	۲**	۰/۰۵**	۱۳**	۱۴**	۰/۰۶**
خطا	۱۸	۰/۰۶	۰/۱	۰/۰۰۳	۰/۵	۰/۴	۰/۰۰۰۵
ضریب تغییرات		۴/۴	۴/۹	۴/۸	۲/۷	۲/۲	۲/۵

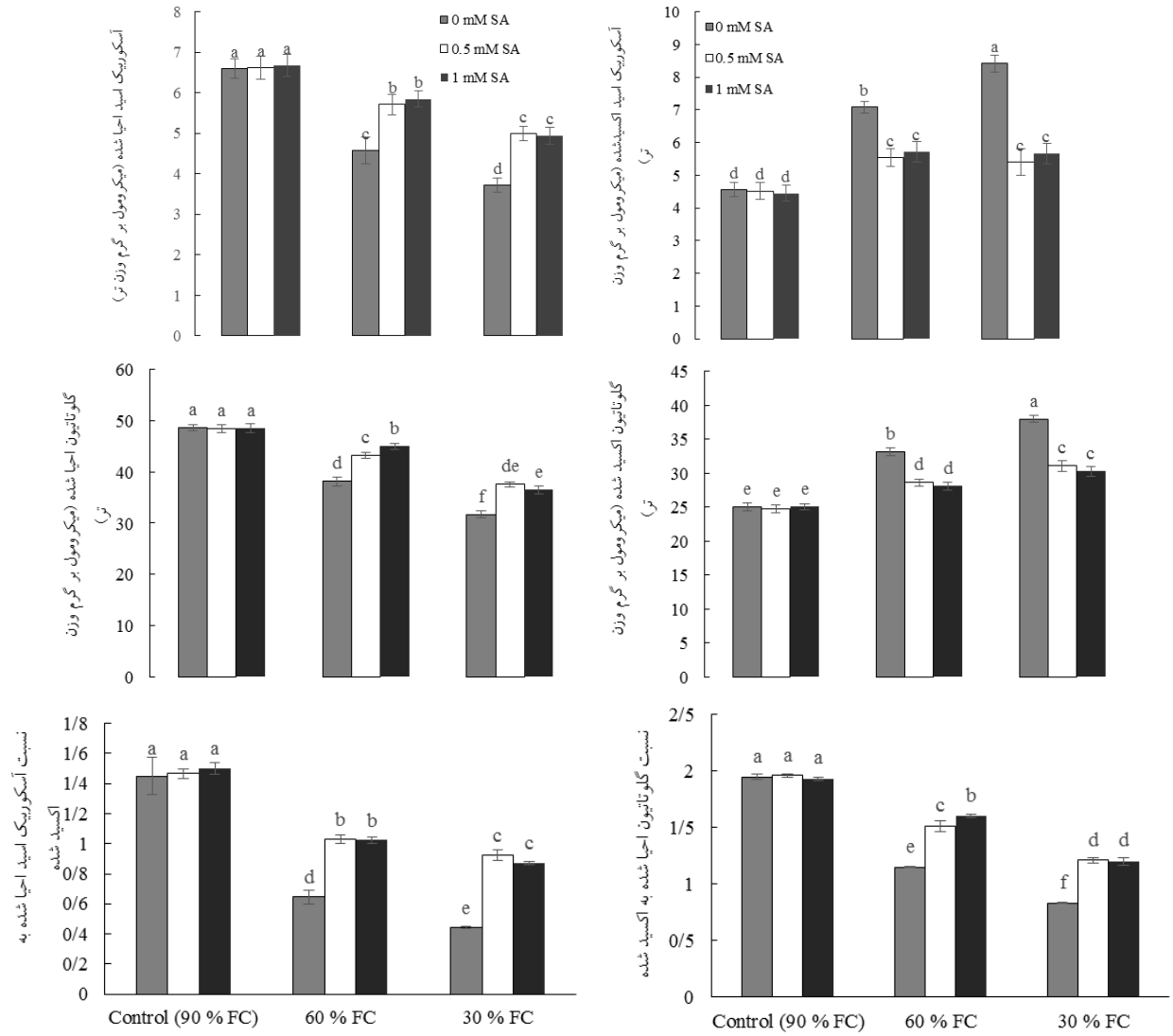
** معنی‌داری در سطح پنج درصد

گ و فعالیت مریستم‌ها شود که باعث کاهش سطح فعال فتوسنتزی و درنتیجه، کاهش رشد و عملکرد گیاه می‌شود (Takahashi *et al.*, 2020). سالیسیلیک اسید از مهم‌ترین هورمون‌های گیاهی است که نقش مهمی در افزایش تحمل به تنش‌های زیستی و غیرزیستی دارد (Zhang *et al.*, 2015). نقش مثبت سالیسیلیک اسید در افزایش تحمل گیاهان به تنش شوری (Nazar *et al.*, 2015)، خشکی (Pál *et al.*, 2014; Abbaszadeh *et al.*, 2020; Sohag *et al.*, 2020) و سمیت فلزات سنگین (Zhang *et al.*, 2015) نیز گزارش شده است. در تحقیق حاضر، کاربرد برگی سالیسیلیک اسید باعث بهبود رشد و زیست‌توده گیاه خرفه تحت تنش خشکی شد که مطابق نتایج بدست آمده توسط Kang و همکاران (۲۰۱۳) و Abbaszadeh و همکاران (۲۰۲۰) است. بهبود رشد گیاه خرفه توسط کاربرد خارجی اسید سالیسیلیک نشان می‌دهد که اسید سالیسیلیک می‌تواند نقش مثبتی در افزایش تحمل گیاه و غلبه بر شرایط نامطلوب ایجادشده تحت تنش خشکی داشته باشد.

محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی از اصلی‌ترین عوامل مؤثر بر کارایی دستگاه فتوسنتز و درنتیجه رشد و عملکرد گیاه است (Ghorbani *et al.*, 2018a). در مطالعه حاضر، تنش خشکی به‌طور قابل توجهی باعث کاهش محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی (کلروفیل *a*، *b* و کاروتنوئیدها)، فلورسانس کلروفیل و فعالیت آنزیم دلتا-آمینولوولینیک اسید دهیدراتاز (آنزیم دخیل در سنتز کلروفیل) و افزایش فعالیت آنزیم کلروفیلاز (آنزیم تجزیه‌کننده کلروفیل) شد، با این حال، تیمار سالیسیلیک اسید از طریق افزایش فعالیت آنزیم آنزیم دلتا-آمینولوولینیک اسید دهیدراتاز و کاهش فعالت آنزیم کلروفیلاز، باعث بهبود محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی و فلورسانس کلروفیل تحت تنش خشکی شد. این نتایج مطابق با نتایج گزارش‌شده توسط La و همکاران (۲۰۱۸) و Idrees و همکاران (۲۰۱۰) است. گزارش شده که هورمون گیاهی سالیسیلیک اسید با کاهش آسیب به دستگاه فتوسنتز ناشی از تجمع ترکیبات سازگار و کاهش سطح رادیکال‌های سمی و همچنین بهبود فعالیت آنزیم‌های سنتزکننده کلروفیل، تخریب کلروفیل را در شرایط استرس‌زا کاهش می‌دهد (Nazar *et al.*, 2015). نتایج مشابهی از بهبود رنگیزه‌های فتوسنتزی توسط کاربرد خارجی اسید سالیسیلیک در گیاه دارویی رازیانه تحت تنش خشکی نیز گزارش شده است. بنابراین، تنظیم متابولیسم کلروفیل و افزایش محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی القاشده توسط سالیسلیک اسید می‌تواند عامل مهمی در افزایش کارایی فتوسنتز و درنتیجه کاهش اثرات منفی تنش خشکی و بهبود رشد گیاه خرفه باشد. با توجه به عدم اطلاعات کافی از نقش اسید سالیسیلیک در فعالیت و یا سطح بیان آنزیم کلروفیلاز، مطالعات بیشتری در سطح مولکولی برای مشخص‌شدن نقش احتمالی اسید سالیسیلیک بر فعالیت آنزیم کلروفیلاز تحت

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1401.11.47.2.1]



شکل ۲- تأثیر کاربرد برگی اسید سالیسیلیک (صفر، ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار (SA)) بر محتوای آسکوربیک اسید احیاشده (A) و اکسیدشده (B)، گلوتاتیون احیاشده (C) و اکسیدشده (D)، نسبت آسکوربیک اسید احیاشده به اکسیدشده (E) و گلوتاتیون احیاشده به اکسیدشده (F) در برگ گیاه خرفه تحت تنش خشکی (۹۰، ۶۰ و ۳۰ درصد ظرفیت زراعی (FC)). میانگین‌های دارای حروف مشترک براساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

تنش خشکی مورد نیاز است.

محتوای آب نسبی برگ از خصوصیات فیزیولوژیکی پاسخ دهنده به تنش خشکی است که همبستگی خوبی با تحمل گیاه به خشکی نشان داده است (Colom and Vazzana, 2003). کاهش پتانسیل آب مانع از تقسیم سلولی، رشد اندام‌ها، فتوسنتز خالص و سنتز پروتئین می‌شود و تعادل هورمونی بافت‌های اساسی گیاه را تغییر می‌دهد. به خوبی مشخص شده است که تحت شرایط تنش‌زا مانند تنش خشکی، محتوای آب نسبی، پتانسیل آب برگ و پتانسیل اسمزی سلول‌ها کاهش می‌یابد (Ma *et al.*, 2006). نتایج نشان داد تنش خشکی باعث کاهش محتوای آب نسبی برگ شد که مطابق نتایج گزارش شده توسط Anjum و همکاران (۲۰۱۱) است. با این‌حال، تیمار سالیسیلیک اسید باعث بهبود محتوای آب نسبی برگ‌ها شد که می‌تواند نقش مهمی در بهبود سازگاری و درنتیجه افزایش رشد گیاه خرفه تحت تنش خشکی داشته باشد. Touhidi Nejad و همکاران (۲۰۱۶) بیان کردند گیاهچه‌های

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-28]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1401.11.47.2.1]

دارویی شنبلیله تیمارشده با اسید سالیسیلیک دارای محتوای آب نسبی بالاتری نسبت به گیاهان تیمارنشده تحت تنش خشکی داشتند. Huang و Fu (۲۰۰۱) بیان داشتند که تنش خشکی با القای ناکارآمدی غشای سلولی در برگ‌ها، باعث افزایش نفوذپذیری غشا نسبت به الکترولیت‌ها می‌شود. Daneshmand و همکاران (۲۰۰۹) نشان دادند که تنش خشکی و شوری باعث پراکسیداسیون غشا و درنتیجه افزایش نشت یونی در گیاهان می‌شوند. نتایج تحقیق ما نشان داد که کاربرد برگی سالیسیلیک اسید باعث بهبود نشت یونی و پایداری غشا در برگ گیاه خرفه تحت تنش خشکی می‌شود که می‌تواند نشان‌دهنده نقش این هورمون گیاهی در افزایش یکپارچگی غشا و همچنین کاهش تنش اکسیداتیو القاشده توسط تنش خشکی باشد. همچنین گزارش شده است که سالیسیلیک اسید از طریق تجمع ترکیبات پلی‌آمین مانند پوترسین، اسپرمیدین و اسپرمین باعث افزایش محتوای آب نسبی برگ و حفظ یکپارچگی و پایداری غشا تحت شرایط خشکی می‌شود (Nemeth *et al*., 2002).

نشان داده شده است که تجمع ترکیبات محلول سازگار مانند پرولین نقش مهمی در تحمل شرایط استرس‌زا دارد و تغییرات آنها تحت تنش‌های مختلف به‌طور گسترده گزارش شده است. در مطالعه حاضر، تنش خشکی باعث افزایش تجمع پرولین به همراه القای فعالیت آنزیم‌های درگیر در متابولیسم پرولین مانند پرولین دهیدروژناز و دلتا -۱-پرولین -۵-کربوکسیلات سنتتاز ۱ شد، با این‌حال، تیمار برگی سالیسیلیک اسید باعث افزایش بیشتر فعالیت آنزیم‌های درگیر در متابولیسم پرولین و درنتیجه افزایش بیشتر پرولین نسبت به تیمارهای خشکی به تنهایی شد. این نتایج مطابق نتایج گزارش شده توسط La و همکاران (۲۰۱۸) و Dianat و همکاران (۲۰۱۶) است. بنابراین افزایش محتوای پرولین تحت کاربرد سالیسیلیک اسید می‌تواند ناشی از تنظیم فعالیت آنزیم‌های درگیر در متابولیسم پرولین باشد که نقش مهمی می‌تواند در افزایش پتانسیل اسمزی و فشار تورگر سلولی و درنتیجه، بهبود سازگاری گیاه تنش خشکی ایفا کند. Idrees و همکاران (۲۰۱۰) بیان داشتند که سالیسیلیک اسید از طریق افزایش فعالیت آنزیم‌های سنتزکننده پرولین و کاهش فعالیت آنزیم‌های تجزیه‌کننده پرولین باعث افزایش تجمع پرولین در شرایط خشکی می‌شود. بنابراین، تجمع پرولین باعث تنظیم اسمزی سلول‌ها شده و یکپارچگی غشا و سایر ماکرومولکول‌های سلولی را حفظ می کند که درنهایت باعث کاهش آسیب‌های ناشی از تنش خشکی می‌شود. سطح بالاتر فعالیت آنزیم پرولین دهیدروژناز در گیاهان تیمارشده با سالیسیلیک اسید می‌تواند ناشی از سطح بالاتر پرولین در این گیاهان باشد.

آنزیم‌های گلی‌اکسالاز I و II بخشی از سیستم گلی‌اکسالاز هستند که در پاک‌سازی بیش از حد متیل گلی‌اکسال ایجادشده تحت شرایط تنش‌زا نقش دارند. متیل گلی‌اکسال تجمع‌یافته تحت شرایط تنش‌زا می‌تواند باعث آسیب به ماکرومولکول‌های زیستی مانند لیپیدهای غشایی شود (Yadav *et al*., 2005). نتایج ما نشان داد که تنش خشکی باعث افزایش محتوای متیل گلی‌اکسال و مالون دی‌آلدئید در برگ گیاه خرفه شد که نشان‌دهنده تنش اکسیداتیو القاشده در گیاه است و با نتایج گزارش شده توسط Kaya (۲۰۲۰) و Hasanuzzaman و همکاران (۲۰۱۸) مطابقت دارد. فعالیت آنزیم‌های گلی‌اکسالاز I و II نیز تحت تنش خشکی با افزایش همراه بود که نشان‌دهنده القا مکانیسم دفاعی گیاه برای مقابله با تنش اکسیداتیو ایجادشده توسط تنش خشکی است. نتایج مشابهی از افزایش فعالیت آنزیم‌های گلی‌اکسالاز I و II توسط Kaya (۲۰۲۰) تحت تنش خشکی قبلاً گزارش شده است. کاربرد برگی سالیسلیک اسید باعث افزایش فعالیت هر دو آنزیم گلی‌اکسالاز I و II و درنتیجه، کاهش سطح ترکیبات سمی متیل گلی‌اکسال و مالون دی‌آلدئید شد که نشان‌دهنده نقش این هورمون در تحمل گیاه به تنش خشکی از طریق سیستم گلی‌اکسالاز است. افزایش فعالیت آنزیم‌های گلی‌اکسالاز I و II توسط کاربرد خارجی سالیسیلیک اسید در گیاه فلفل (Kaya, 2020) تحت تنش خشکی نیز گزارش شده است.

چرخه آسکوربات-گلوتاتیون از مکانیسم‌های مهم برای از بین‌بردن انواع اکسیژن‌های فعال در گیاهان تحت شرایط تنش

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1401.11.47.2.1]

است (Ghasemi-Omran *et al.*, 2021). نتایج ما نشان داد تنش خشکی به‌ویژه آبیاری ۳۰ درصد ظرفیت زراعی باعث کاهش محتوای آسکوربیک اسید و گلوتاتیون احیا شده و در نتیجه، کاهش نسبت‌های آسکوربیک اسید احیاشده به اکسید شده و گلوتاتیون احیاشده به اکسیدشده در برگ گیاه خرفه شد. این تغییرات می‌تواند نتیجه جمع انواع رادیکال‌های آزاد سمی القاشده توسط تنش خشکی باشد. از آن‌جایی‌که آنزیم آسکوربات پراکسیداز برای فعالیت خود از آسکوربیک اسید احیاشده به‌عنوان دهنده الکترون استفاده می‌کند، افزایش این آنزیم می‌تواند یکی از دلایل کاهش سطح آسکوربیک اسید احیاشده باشد. نتایج مشابهی از کاهش سطح آسکوربیک اسید و گلوتاتیون احیاشده تحت تنش خشکی توسط Pyngrope و همکاران (۲۰۱۳) و Abbaspour و Ehsanpour (۲۰۱۶) گزارش شده است. کاربرد برگی اسید سالیسیلیک باعث بهبود محتوای آسکوربیک اسید و گلوتاتیون احیاشده در برگ گیاه خرفه شد که با نتایج بدست آمده توسط Kang و همکاران (۲۰۱۳) و Abbaspour و Ehsanpour (۲۰۱۶) مطابق دارد. حفظ سطح پایدار گلوتاتیون و آسکوربیک در مقابله با تنش اکسیداتیو ایجادشده تحت شرایط گیاه اهمیت زیادی دارد. Abbaspour و Ehsanpour (۲۰۱۶) بیان داشتند که سالیسیلیک اسید با افزایش فعالیت آنزیم‌های درگیر در بازسازی گلوتاتیون و آسکوربیک اسید مانند گلوتاتیون ردوکتاز، باعث افزایش سطح آسکوربیک اسید و گلوتاتیون و درنتیجه بهبود تحمل گیاه تحت تنش خشکی شدند. Kang و همکاران (۲۰۱۳) نشان دادند که کاربرد خارجی سالیسیلیک اسید از طریق افزایش سطح بیان آنزیم‌های درگیر در شبکه آسکوربیک اسید گلوتاتیون، مانند آنزیم‌های گلوتاتیون ردوکتاز، مونودهیدرو آسکوربات ردوکتاز و گلوتاتیون S-ترانسفرازها باعث افزایش سطح آسکوربیک اسید و گلوتاتیون و درنتیجه بهبود سازگاری گیاه به تنش خشکی شدند. بنابراین، می‌توان پیشنهاد کرد که کاربرد خارجی اسید سالیسیلیک از طریق بهبود متابولیت‌های چرخه آسکوربیک اسید-گلوتاتیون باعث افزایش تحمل و در نتیجه بهبود رشد گیاه خرفه تحت تنش خشکی شد.

نتیجه‌گیری

نتایج کلی نشان داد محلول‌پاشی برگی اسید سالیسیلیک با تنظیم چندین پاسخ فیزیولوژیکی باعث بهبود تحمل گیاه خرفه به تنش خشکی شد. تیمار اسید سالیسیلیک با تنظیم متابولیسم کلروفیل، باعث بهبود رنگیزه‌های فتوسنتزی و فلورسانس کلروفیل و درنتیجه، بهبود رشد و زیست‌توده گیاه خرفه تحت تنش خشکی شد. محلول‌پاشی برگی اسید سالیسیلیک از طریق تنظیم متابولیسم پرولین، باعث افزایش محتوای پرولین و همچنین تعدیل چرخه آسکوربیک اسید-گلوتاتیون و بهبود آنزیم‌های سیستم گلی‌اکسالاز، باعث کاهش سطح متیل گلی‌اکسال و مالون دی‌آلدئید و درنتیجه، بهبود رطوبت آب نسبی و پایداری غشا شدند که به‌طور مؤثری منجر به افزایش تحمل گیاه خرفه تحت تنش خشکی شد.

منابع

Abbaspour, J. and Ehsanpour, A. A. (2016) Physiological targets of salicylic acid on *Artemisia aucheri* BOISS as a medicinal and aromatic plant grown under in vitro drought stress. Botanical Studies 57: 39.

Abbaszadeh, B., Layeghhaghighi, M., Azimi, R. and Hadi, N. (2020) Improving water use efficiency through drought stress and using salicylic acid for proper production of *Rosmarinus officinalis* L. Industrial Crops and Products 144: 111893.

Anjum, S., Wang, L., Xiao-yuie, X., Long-chang, W., Muhammad Saleem, F., Chen, M. and Wang, L. (2011) Brassinolide application improves the drought tolerance in maize through modulation of enzymatic antioxidants and leaf gas exchange. Journal of Agronomy and Crop Science 197: 177-185.

Bates, L. S., Waldern, R. P. and Tear, I. D. (1973) Rapid determination of free proline for water stress studies. Plant and Soil 39: 205-207.

Blum, A. (2017) Osmotic adjustment is a prime drought stress adaptive engine in support of plant production. Plant, Cell and Environment 40: 4-10.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1401.11.47.2.1]

Boaretto, L. F., Carvalho, G., Borgo, L., Creste, S., Landell, M. G., Mazzafera, P. and Azevedo, R. A. (2014) Water stress reveals differential antioxidant responses of tolerant and non-tolerant sugarcane genotypes. Plant Physiology and Biochemistry 74: 165-175.

Charest, C. and Phan, C. T. (1990) Cold-acclimation of wheat (*Triticum aestivum*) - properties of enzymes involved in proline metabolism. Physiologia Plantarum 80: 159-168.

Colom, M. R. and Vazzana, C. (2003) Photosynthesis and PSII functionality of drought-resistant and drought-sensitive weeping lovegrass plants. Environmental and Experimental Botany 49: 135-144.

Costa, M. L., Civello, P. M., Chaves, A. R. and Martinez, G. A. (2005) Effect of ethephon and 6–benzylaminopurine on chlorophyll degrading enzymes and a peroxidase–linked chlorophyll bleaching during post–harvest senescence of broccoli (*Brassica oleracea* L.) at 20˚ C. Postharvest Biology and Technology 35: 191-9.

Daneshmand, F. M., Arvin, J. and Kalantari, K. (2009) Effect of acetylsalicylic acid (aspirin) on salt and osmotic stress tolerance in *Solanum bulbocastanum* in vitro enzymatic antioxidants. American Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Sciences 6: 92-99.

Dianat, M., Saharkhiz, M. J. and Tavassolian, I. (2016) Salicylic acid mitigates drought stress in *Lippia citriodora* L.: effects on biochemical traits and essential oil yield. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology 8: 286-293.

Estaji, A. and Niknam, F. (2020) Foliar salicylic acid spraying effect' on growth, seed oil content, and physiology of drought-stressed *Silybum marianum* L. plant. Agricultural Water Management 234: 106116

Gerami, M., Ghorbani, A. and Karimi, S. (2018) Role of salicylic acid pretreatment in alleviating cadmium-induced toxicity in *Salvia officinalis* L. Iranian Journal of Plant Biology 10: 81-95.

Ghasemi-Omran, V. O., Ghorbani, A. and Sajjadi-Otaghsara, S. A. (2021) Melatonin alleviates NaCl-induced damage by regulating ionic homeostasis, antioxidant system, redox homeostasis, and expression of steviol glycosides-related biosynthetic genes in in vitro cultured *Stevia rebaudiana* Bertoni. In Vitro Cellular and Developmental Biology – Plant 57: 319-331.

Ghorbani, A., Ghasemi Omran, V. O., Razavi, S. M., Pirdashti, H. and Ranjbar, M. (2019a) *Piriformospora indica* confers salinity tolerance on tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) through amelioration of nutrient accumulation, K^+/Na^+ homeostasis and water status. Plant Cell Repports 38: 1151-1163.

Ghorbani, A., Pishkar, L., Roodbari, N., Ali, Tavakoli, S., Moein Jahromi, E. and Chu, W. (2022) Nitrate reductase is needed for methyl jasmonate-mediated arsenic toxicity tolerance of rice by modulating the antioxidant defense system, glyoxalase system and arsenic sequestration mechanism. Journal of Plant Growth Regulation.

Ghorbani, A., Pishkar, L., Roodbari, N., Pehlivan, N. and Wu, C. (2021) Nitric oxide could allay arsenic phytotoxicity in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) by modulating photosynthetic pigments, phytochelatin metabolism, molecular redox status and arsenic sequestration. Plant Physiology and Biochemistry 167: 337-348.

Ghorbani, A., Razavi, S. M., Ghasemi Omran, V. O. and Pirdashti, H. (2018a) *Piriformospora indica* alleviates salinity by boosting redox poise and antioxidative potential of tomato. Russian Journal of Plant Physiology 65: 898-907.

Ghorbani, A., Razavi, S. M., Ghasemi Omran, V. O. and Pirdashti, H. (2018b) *Piriformospora indica* alleviates salinity by boosting redox poise and antioxidative potential of tomato. Russian Journal of Plant Physiology 65: 898-907.

Ghorbani, A., Razavi, S. M., Ghasemi, V. and Pirdeshti, H. (2019b) Effects of endophyte fungi symbiosis on some physiological parameters of tomato plants under 10 day long salinity stress. Journal of Plant Process and Function. 7: 193-208.

Ghorbani, A., Tafteh, M., Roudbari, N., Pishkar, L., Zhang, W. and Wu, C. (2020) *Piriformospora indica* augments arsenic tolerance in rice (*Oryza sativa*) by immobilizing arsenic in roots and improving iron translocation to shoots. Ecotoxicology and Environmental Safety 209: 111793.

Ghorbani, A., Zarinkamar, F. and Falah, A. (2011) Effect of cold stress on the anatomy and morphology of the tolerant and sensitive cultivars of rice during germination. Journal of Cell and Tissue 2: 235-244.

Ghorbani, A., Zarinkamar, F. and Fallah, A. (2009) The effect of cold stress on the morphologic and physiologic characters of two rice varieties in seedling stage. Journal of Crop Breeding 1: 50-66.

Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Rahman, A., Inafuku, M., Oku, H. and Fujita, M. (2018) Exogenous nitric oxide donor and arginine provide protection against short-term drought stress in wheat seedlings. Physiology and Molecular Biology of Plants 24: 993-1004.

Hayat, S., Hasan, S. A., Fariduddin, Q. and Ahmad, A. (2008) Growth of tomato (*Lycopersicon esculentum*) in response to salicylic acid under water stress. Journal of Plant Interactions 3: 297-304.

Heath, R. L. and Packer, L. (1968) Photoperoxidation in isolated chloroplasts. Archives of Biochemistry and Biophysics 125: 189-198.

Horvath, E., Szalai, G. and Janda, T. (2007) Induction of abiotic stress tolerance by salicylic acid signaling. Journal of Plant Growth Regulation 26: 290-300.

Huang, B. and Fu, J. (2001) Growth and physiological responses of tall fescue to surface soil drying. International Turfgrass Society Research Journal 9: 291-296.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1401.11.47.2.1]

Hura, T., Dziurka, M., Hura, K., Ostrowska, A. and Dziurka, K. (2015) Free and cell wall-bound polyamines under long-term water stress applied at different growth stages of × Triticosecale Wittm. PLoS One 10: e0135002.

Idrees, M., Khan, M. M. A., Aftab, T., Naeem, M. and Hashmi, N. (2010) Salicylic acid-induced physiological and biochemical changes in lemongrass varieties under water stress. Journal of Plant Interactions 5: 293-303.

Iranshahy, M., Javadi, B., Iranshahi, M., Jahanbakhsh, S. P., Mahyari, S., Hassani, F. V. and Karimi, G. (2017) A review of traditional uses, phytochemistry and pharmacology of *Portulaca oleracea* L. Journal of Ethnopharmacology 205: 158-172.

Jain, M. and Gadre, R. (2004) Inhibition of chlorophyll biosynthesis by mercury in excised etiolated maize leaf segments during greening: Effect of 2-oxoglutarate. Indian Journal of Experimental Biology 42: 419-423.

Kabiri, R., Hatami, A. and Naghizadeh, M. (2014) Effect of drought stress and its interaction with salicylic acid on fennel (*Foeniculum vulgare* mill.) germination and early seedling growth. Journal of Medicinal Plants and By Products 3: 107-116.

Kang, G. Z., Li, G. Z., Liu, G. Q., Xu, W., Peng, X. Q., Wang, C. Y., Zhu, Y. J. and Guo, T. C. (2013) Exogenous salicylic acid enhances wheat drought tolerance by influence on the expression of genes related to ascorbate-glutathione cycle. Plant Biology 57: 718-724.

Kaya, C. (2020) Nitrate reductase is required for salicylic acid-induced water stress tolerance of pepper by upraising the AsA-GSH pathway and glyoxalase system. Physiologia Plantarum.

Khan, N., Bano, A., Atikur Rahman, M., Guo, J., Kang, Z. and Babar, M. A. (2019) Comparative physiological and metabolic analysis reveals a complex mechanism involved in drought tolerance in Chickpea (*Cicer arietinum* L.) induced by PGPR and PGRs. Scientific Reports 9: 2097.

Koo, Y. M., Heo, A. Y. and Choi, H. W. (2020) Salicylic acid as a safe plant protector and growth regulator. The Plant Pathology Journal 36: 1-10.

La, V. H., Lee, B. R., Zhang, Q., Park, S. H., Islam, M. T. and Kim, T. H. (2018) Salicylic acid improves drought-stress tolerance by regulating the redox status and proline metabolism in *Brassica rapa*. Horticulture, Environment, and Biotechnology 60: 31-40.

Lichtenthaler, H. K. (1987) Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. Methods in Enzymology 148: 350-382.

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

Ma, Q. Q., Wang, W, L. I. Y. H., Li, D. Q. and Zou, Q. (2006) Alleviation of photoinhibition in drought-stressed wheat (*Triticum aestivum*) by foliar applied glycine betaine. Journal of Plant Physiology 163: 165-175.

Nazar, R., Umar, S. and Khan, N. A. (2015) Exogenous salicylic acid improves photosynthesis and growth through increase in ascorbate-glutathione metabolism and S assimilation in mustard under salt stress. Plant Signaling and Behavior 10: e1003751.

Nemeth, M., Janda, T., Horvath, E., Paldi, E. and Szalai, G. (2002) Exogenous salicylic acid increase polyamine content but may decreases drought tolerance in maize. Plant Science 162: 569-574.

Pal, M., Kovacs, V., Szalai, G., Soos, V., Ma, X., Liu, H., Mei, H. and Janda, T. (2014) Salicylic acid and abiotic stress responses in rice. Journal of Agronomy and Crop Science 200: 1-11.

Principato, G. B., Rosi, G., Talesa, V., Govannini, E. and Uolila, L. (1987) Purification and characterization of two forms of glyoxalase II from rat liver and brain of Wistar rats. Biochimica et Biophysica Acta 911: 349-355.

Pyngrope, S., Bhoomika, K. and Dubey, R. S. (2013) Reactive oxygen species, ascorbate–glutathione pool, and enzymes of their metabolism in drought-sensitive and tolerant indica rice (*Oryza sativa* L.) seedlings subjected to progressing levels of water deficit. Protoplasma 250: 585-600.

Ramezani, M., Enayati, M., Ramezani, M. and Ghorbani, A. (2021) A study of different strategical views into heavy metal (oid) removal in the environment. Arabian Journal of Geosciences 14: 2225.

Smart, R. E. and Bingham, G. E. (1974) Rapid estimates of relative water content. Plant Physiology 53: 258-260.

Sohag, A. A. M., Tahjib-Ul-Arif, M., Brestic, M., Afrin, S., Sakil, M. A., Hossain, M. T., Hossain, M. A. and Hossain, M. A. (2020) Exogenous salicylic acid and hydrogen peroxide attenuate drought stress in rice. Plant, Soil and Environment 66: 7-13.

Sumithra, K., Jutur, P. P., Carmel, B. D. and Reddy, A. R. (2006) Salinity-induced changes in two cultivars of *Vigna radiata*: Responses of antioxidative and proline metabolism. Plant Growth Regulation 50: 11-22.

Takahashi, F., Kuromori, T., Urano, K., Yamaguchi-Shinozaki, K. and Shinozaki, K. (2020) Drought stress responses and resistance in plants: From cellular responses to long-distance intercellular communication. Frontiers in Plant Science 11: 556972.

Touhidi Nejad, Z., Farahbakhsh, H. and Maghsoudi Moud, A. A. (2016) Evaluation of salicylic acid effects on some physiological traits of Fenugreek under drought stress. Journal of Plant Process and Function 5: 85-96.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1401.11.47.2.1]

Wild, R., Ooi, L., Srikanth, V. and Munch, G. (2012) A quick, convenient and economical method for the reliable determination of methylglyoxal in millimolar concentrations: The N-acetyl-L-cysteine assay. Analytical and Bioanalytical Chemistry 403: 2577-2581.

Yadav, S. K., Singla-Pareek, S. L., Ray, M., Reddy, M. K. and Sopory, S. K. (2005) Methylglyoxal levels in plants under salinity stress are dependent on glyoxalase I and glutathione. Biochemical and Biophysical Research Communications 337: 61-7.

Zhang, Y., Xu, S., Yang, S. and Chen, Y. (2015) Salicylic acid alleviates cadmium-induced inhibition of growth and photosynthesis through upregulating antioxidant defense system in two melon cultivars (*Cucumis melo* L.). Protoplasma 252: 911-924.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1401.11.47.2.1]

The effect of salicylic acid under drought stress on some physiological and biochemical traits of *Portulaca oleracea* L.

Farnaz Saheri[1], Giti Barzin*[1], Leila Pishkar[1], Masoud Mashhadi Akbar Boojar[2] and Laleh Babaeekhou[1]

[1] Department of Biology, Islamshahr Branch, Islamic Azad University, Islamshahr, Iran
[2] Department of Biology Science, Kharazmi University, Tehran, Iran
(Received: 02/01/2021, Accepted: 07/09/2021)

Abstract

With respect to increase trend of drought development and lack of desirable land for agriculture in the whole world, the use of drought resistant species or the use of compounds that reduce the effects of drought stress and induction of resistance to stress in plants is very important. In the present study, the effects of salicylic acid (SA) foliar spray (0, 0.5 and 1 mM) on physiological and biochemical responses of purslane (*Portulaca oleracea* L.) as a medicinal plant under drought stress (90, 60 and 30% of field capacity (FC)) were examined in a factorial experiment based on a completely randomized design with four replications in Islamshahr Branch, Islamic Azad University, Islamshahr, Iran. The results showed that 60 and 30% FC reduced the height (18.5 and 45%, respectively) and total dry weight (43.1 and 58.6%) of the plant compared to the control treatment. On the other hand, drought stress, especially 30% FC, reduced photosynthetic pigments, relative water content, membrane stability and induced oxidative stress (increased levels of methylglyoxal and malondialdehyde). However, foliar application of SA by regulating chlorophyll metabolism (activity of chlorophyllase and delta-aminolevulinic acid dehydratase) and improving proline metabolism (activity of proline dehydrogenase and delta-1-proline-5-carboxylate synthetase 1) increased the contents of chlorophylls and proline and, consequently, improved photosynthetic apparatus efficiency and relative water content under drought stress. Also, SA improved plant tolerance to drought stress by increasing the activity of enzymes involved in the glyoxalase system and improving the redox state of the ascorbic acid-glutathione cycle. Therefore, SA under drought stress can play an effective role in reducing and modulating the negative effects of stress.

Keywords: *Portulaca oleracea*, Drought stress, Salicylic acid, Gas exchange, Glyoxalase system

Corresponding author, Email: Gitibarzin@iiau.ac.ir

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1401.11.47.2.1]