



Exogenous salicylic acid enhances photosynthetic efficiency, yield and fatty acid composition in safflower (*Carthamus tinctorius* L.) under extreme heat stress

Maryam Goodarzian Ghahfarokhi¹ | Afrasyab Rahnama^{2✉} | Moosa Meskarbashee³ | Donald L. Smith⁴

1. Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: m-goodarzian@phdstu.scu.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: a.rahnama@scu.ac.ir
3. Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: mmeskarbashee@scu.ac.ir
4. Department of Plant Science, Faculty of Agricultural and Environmental Sciences, McGill University, Montreal, Canada. E-mail: donald.smith@mcgill.ca

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received 27 July 2025 Received in revised form 22 September 2025 Accepted 4 November 2025 Published online 5 January 2026 Keywords: <i>Chlorophyll index</i> <i>High temperatures</i> <i>Stomatal conductance</i> <i>Unsaturated fatty acids</i>	Objective: Exogenous application of salicylic acid (SA) has the potential to improve photosynthetic performance and seed oil composition under heat stress. This study aimed to evaluate whether foliar SA treatment can mitigate terminal heat stress in safflower by enhancing photosynthetic traits and by altering seed oil fatty acid composition, and to compare responses between a heat-tolerant and a heat-sensitive cultivar. Methods: A field experiment was conducted at Shahid Chamran University of Ahvaz using a split-plot RCBD with three replications. Main plots were two sowing dates: normal sowing (11 December) and late sowing (21 January). Subplots comprised a factorial combination of SA concentrations (0 and 400 μM) and two safflower cultivars: Parnian (heat-sensitive) and Faraman (heat-tolerant). Late sowing subjects the crop to severe terminal heat during flowering and grain filling. Photosynthetic parameters and fatty acid composition of seeds were measured, and grain yield was recorded. Results: Late sowing (heat stress) significantly reduced photosynthetic rate, stomatal conductance, transpiration rate, substomatal CO_2, carboxylation efficiency, and photosynthetic water-use efficiency. Foliar SA application mitigated these negative effects, with the most favorable responses under 400 μM SA and normal sowing. The Faraman cultivar sown at normal time and treated with 400 μM SA achieved the highest stomatal conductance ($711 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), carboxylation efficiency ($1.079 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), and grain yield ($3120 \text{ kg ha}^{-1}$). Fatty acid responses to heat were cultivar-dependent: stearic acid decreased in Faraman but increased in Parnian under heat stress (-48% vs $+64\%$, respectively). SA treatment under late sowing increased oleic and linoleic acids while reducing linolenic and palmitic acids, contributing to modified seed oil composition that is favorable under heat stress. Conclusion: Terminal heat stress altered photosynthetic performance, yield, and seed oil fatty-acid profiles in safflower. Foliar SA application mitigated heat-induced declines in photosynthesis and influenced oil composition, with more pronounced benefits in the heat-tolerant Faraman cultivar. SA at 400 μM provides a viable means to enhance heat tolerance and potentially improve oil quality in safflower under heat stress.

Cite this article: Goodarzian Ghahfarokhi, M., Rahnama, A., Meskarbashee, M., & Smith, D. L. (2026). Exogenous salicylic acid enhances photosynthetic efficiency, yield and fatty acid composition in safflower (*Carthamus tinctorius* L.) under extreme heat stress. *Journal of Crops Improvement*, 27 (4), 591-610.
DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2025.399546.2946>





تأثیر محلول پاشی سالیسیلیک اسید بر بهبود کارایی فتوسنتزی، عملکرد و ترکیب اسیدهای چرب گلرنگ زراعی (*Carthamus tinctorius* L.) در شرایط تنش گرما

مریم گودرزیان قهفرخی^۱ | افراسیاب راهنما^۲ | موسی مسکرباشی^۳ | دونالد اسمیت^۴

۱. گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: m-goodarziaan@phdstu.scu.ac.ir
۲. نویسنده مسؤول، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: a.rahnama@scu.ac.ir
۳. گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: mmeskarbashee@scu.ac.ir
۴. گروه علوم گیاهی، دانشکده علوم محیطی و کشاورزی، دانشگاه مک گیل، مونترال، کانادا. رایانامه: donald.smith@mcgill.ca

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

هدف: کاربرد سالیسیلیک اسید سبب بهبود راندمان فتوسنتزی و عملکرد و تغییر ترکیب اسیدهای چرب روغن دانه گلرنگ در شرایط تنش گرما می شود. از این رو، هدف از این مطالعه بررسی پتانسیل کاربرد سالیسیلیک اسید در کاهش اثرات نامطلوب تنش گرمای آخر فصل بر گلرنگ با بهبود راندمان فتوسنتز و ترکیب اسیدهای چرب روغن دانه بود.

روش پژوهش: به منظور ارزیابی اثرات محلول پاشی برگ سالیسیلیک اسید بر ویژگی های فتوسنتزی و ترکیب اسیدهای چرب گلرنگ، آزمایشی مزرعه ای در دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. طرح آزمایشی به صورت اسپلیت پلات فاکتوریل بر پایه طرح بلوک های کامل تصادفی با سه تکرار بود. کرت های اصلی شامل دو تاریخ کاشت ۲۰ آذرماه (کاشت به هنگام) و ۳۰ دی ماه (کاشت دیر هنگام) و کرت های فرعی شامل ترکیبی فاکتوریل از غلظت های سالیسیلیک اسید (صفر و ۴۰۰ میکرومولار) و دو رقم گلرنگ پرنیان (حساس به گرما) و فرامان (مقاوم به گرما) بودند.

یافته ها: نتایج این پژوهش نشان داد که تنش گرمایی ناشی از کاشت دیر هنگام، به طور معنی داری سبب کاهش در صفات فتوسنتزی شامل سرعت فتوسنتز، هدایت روزنه ای، سرعت ترقق، غلظت دی اکسید کربن زیر روزنه ای، کارایی کربوکسیلاسیون و کارایی مصرف آب فتوسنتزی گردید. کاربرد سالیسیلیک اسید تا حد زیادی توانست اثرات منفی تنش گرمایی را بر این صفات تعدیل نماید، به گونه ای که بیش ترین هدایت روزنه ای و کارایی کربوکسیلاسیون (به ترتیب ۷۱۱ و ۱/۰۷۹ میلی مول بر مترمربع بر ثانیه) و عملکرد دانه (۳۱۲۰ کیلوگرم در هکتار) در کاشت به هنگام و کاربرد ۴۰۰ میکرومولار سالیسیلیک اسید در رقم فرامان مشاهده شد. علاوه بر این، تنش گرمایی موجب تغییر در ترکیب اسیدهای چرب روغن دانه شد، به طوری که کاشت دیر هنگام باعث کاهش درصد اسیدهای چرب اولئیک و لینولئیک و افزایش درصد اسیدهای لینولئیک و پالمیتیک گردید. تغییرات درصد استئاریک اسید تحت تنش گرمایی در دو رقم مورد مطالعه متفاوت بود، به طوری که در رقم فرامان کاهش (۴۸ درصد) و در رقم پرنیان افزایش (۶۴ درصد) نشان داد. محلول پاشی سالیسیلیک اسید، به ویژه در شرایط کاشت دیر هنگام، موجب افزایش درصد اسیدهای چرب اولئیک و لینولئیک و کاهش درصد اسیدهای لینولئیک و پالمیتیک شد.

نتیجه گیری: کاربرد سالیسیلیک اسید توانست با بهبود صفات فتوسنتزی و تعدیل ترکیب اسیدهای چرب، اثرات نامطلوب تنش گرمایی را کاهش داده و در نتیجه منجر به افزایش تحمل به گرما و بهبود کیفیت روغن در هر دو رقم گردد. این تأثیرات در رقم متحمل به گرما (فرامان) نسبت به شرایط شاهد مشهودتر بود.

کلیدواژه ها:

اسیدهای چرب غیر اشباع
دماهای بالا
شاخص کلروفیل
هدایت روزنه ای

استناد: گودرزیان قهفرخی، مریم؛ راهنما، افراسیاب؛ مسکرباشی، موسی و اسمیت، دونالد (۱۴۰۴). تأثیر محلول پاشی سالیسیلیک اسید بر بهبود کارایی فتوسنتزی، عملکرد و ترکیب اسیدهای چرب گلرنگ زراعی (*Carthamus tinctorius* L.) در شرایط تنش گرما. به زراعی کشاورزی، ۲۷ (۴)، ۵۹۱-۶۱۰. DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2025.399546.2946>



۱. مقدمه

درحالی که تأثیر رویدادهای شدید اقلیمی مانند خشکی و گرما بر امنیت غذایی بسته به مکان و زمان سال متفاوت است (هریسون^۱ و همکاران، ۲۰۲۴؛ راهنما^۲ و همکاران، الف ۲۰۲۴)، تصور می شود مناطق گرمسیری مرطوب بیشترین افزایش تنش گرمایی را در اقلیم آینده تجربه خواهند کرد (چانگ-فانگ-مارتل^۳ و همکاران، ۲۰۲۱). تنش گرما یکی از محدودیت های عمده محیطی است که به طور نامطلوبی بر رشد، نمو و بهره وری گیاهان زراعی در سراسر جهان، به ویژه در گیاهان روغنی مانند گلرنگ تأثیر می گذارد (صالحی^۴ و همکاران، ۲۰۲۳). تنش گرمای آخر فصل که در طول گلدهی و پرشدن دانه رخ می دهد، فتوسنتز و متابولیسم چربی را مختل می کند و باعث کاهش عملکرد و کیفیت روغن می شود (راهنما و همکاران، ۲۰۲۴ ب). دمای بالا با آسیب رساندن به فتوسیستم II، کاهش محتوای کلروفیل و مهار آنزیم های کلیدی مانند روبیسکو، دستگاه فتوسنتزی را مختل می کند و منجر به کاهش هدایت روزنه ای و سرعت خالص فتوسنتز می شود (کرافتس-براندنر^۵ و سالوکی^۶، ۲۰۰۲). تنش گرما همچنین با افزایش پراکسیداسیون لیپیدها و اختلال در یکپارچگی غشا، پروفایل اسیدهای چرب روغن دانه را تغییر می دهد (راهنما و همکاران، ۲۰۲۴ ب). درجه غیراشباع سازی اسیدهای چرب، به ویژه اسیدهای لینولئیک و لینولنیک، نقش حیاتی در حفظ سیالیت و عملکرد غشا در شرایط تنش دارد (هی^۷ و همکاران، ۲۰۲۰). بنابراین، تثبیت فتوسنتز و حفظ متابولیسم لیپید، از جمله راهبردهای حیاتی برای بهبود تحمل حرارتی در گیاهان زراعی هستند.

سالیسیلیک اسید یک هورمون گیاهی فنلی است که نقش تنظیمی آن در واکنش های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاه به تنش های غیرزیستی، از جمله گرما، شناخته شده است (حیات^۸ و همکاران، ۲۰۱۰). مطالعات متعددی گزارش داده اند که کاربرد سالیسیلیک اسید می تواند متابولیسم لیپید را در شرایط تنش بهبود بخشد و در نتیجه از یکپارچگی و عملکرد غشا محافظت کند (هوروات^۹ و همکاران، ۲۰۰۷؛ جمشیدی جم^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۳). باوجود شواهد فزاینده ای مبنی بر اثرات مفید سالیسیلیک اسید در محصولات زراعی مختلف، مطالعاتی که به طور ویژه نقش تنظیم کننده رشد گیاهی را در تعدیل پروفایل اسیدهای چرب در گلرنگ تحت تنش گرمای شدید بررسی می کنند، محدود هستند. بنابراین، این پژوهش با هدف ارزیابی تأثیر سالیسیلیک اسید بر کارایی فتوسنتز، عملکرد و پروفایل اسیدهای چرب روغن دانه گلرنگ تحت تنش گرمای شدید در مراحل زایشی انجام شده است. درک این واکنش های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی به توسعه راهبردهای لازم برای تعدیل کاهش عملکرد دانه ناشی از دماهای بالا و توسعه شیوه های زراعی در راستای بهبود کیفیت روغن دانه و تحمل حرارتی گلرنگ بسیار مهم است.

۲. پیشینه پژوهش

مطالعات نشان داده است که کاربرد سالیسیلیک اسید با فعال کردن سیستم دفاع آنتی اکسیدانی، محافظت از رنگدانه های

1. Harrison
2. Rahnama
3. Chang-Fung-Martel
4. Salehi
5. Crafts-Brandner
6. Salvucci
7. He
8. Hayat
9. Horváth
10. Jamshidi Jam

فتوستتزی و حفظ پایداری غشای کلروپلاست، تحمل گرما را افزایش می‌دهد (هوروات و همکاران، ۲۰۰۷). در گندم، تیمار سالیسیلیک‌اسید سبب بهبود سرعت فتوستتزی، هدایت روزنه‌ای و پارامترهای فلورسانس کلروفیل در شرایط تنش گرما شد، درحالی‌که محتوای مالون‌دی‌آلدهید را کاهش داد (خان^۱ و همکاران، ۲۰۱۳). در گلرنگ، قرارگرفتن در معرض تنش گرمای آخر فصل در طول مرحله زایشی منجر به کاهش محتوای روغن و تغییر در پروفایل اسیدهای چرب دانه شد که از عوامل کلیدی تعیین‌کننده کیفیت روغن هستند (راهنما و همکاران، ۲۰۲۴). گزارش شده است که دماهای بالا سبب افزایش اسیدهای چرب اشباع و کاهش اسیدهای چرب غیراشباع مانند اسیدهای لینولنیک و لینولنیک گردید (راهنما و همکاران، ۲۰۲۴). ترکیب اسیدهای چرب دانه‌ها به‌شدت تحت تأثیر شرایط محیطی قرار دارد، زیرا تنش گرما پراکسیداسیون لیپید را تسریع می‌کند، غشاهای سلولی را بی‌ثبات می‌کند و فعالیت آنزیم‌های دخیل در غیر اشباع‌سازی اسیدهای چرب را کاهش می‌دهد (صالحی و همکاران، ۲۰۲۳). حفظ تعادل بهینه اسیدهای چرب غیراشباع برای پایداری غشا و بقای گیاه تحت تنش حرارتی بسیار مهم است (ما^۲ و همکاران، ۲۰۱۵). در گلرنگ، تیمار سالیسیلیک‌اسید تحت تنش شوری، نسبت اسیدهای چرب غیراشباع را افزایش داد که نشان‌دهنده بهبود سیالیت و انعطاف‌پذیری غشا است (جمشیدی جم و همکاران، ۲۰۲۳). اثرات محافظتی مشابهی در سایر محصولات زراعی مانند برنج مشاهده شده است، که در آن‌ها سالیسیلیک‌اسید پراکسیداسیون لیپید را کاهش داده و پروفیل اسیدهای چرب را در شرایط تنش گرما تغییر داده است (پراسرتایی^۳ و همکاران، ۲۰۲۲).

خواص آنتی‌اکسیدانی سالیسیلیک‌اسید به کاهش تجمع گونه‌های اکسیژن واکنش‌گر و پراکسیداسیون لیپیدها در طول تنش گرمایی و به‌نوبه خود به حفظ ترکیب اسیدهای چرب کمک می‌کند (هوروات و همکاران، ۲۰۰۷). علاوه بر این، سالیسیلیک‌اسید بر بیان ژن‌های دخیل در بیوستتزی و غیر اشباع‌سازی اسیدهای چرب تأثیر می‌گذارد و در نتیجه کیفیت روغن دانه را در شرایط تنش تعدیل می‌کند (کاچرو^۴ و همکاران، ۲۰۰۵). با توجه به اهمیت اقتصادی روغن گلرنگ غنی از اسیدهای چرب غیراشباع چندگانه، بررسی نقش سالیسیلیک‌اسید در تعدیل صفات فتوستتزی و ترکیب اسیدهای چرب تحت تنش گرمایی انتهای فصل از اهمیت بالایی برخوردار است.

۳. روش‌شناسی پژوهش

۳.۱. روش کار و تیمارهای آزمایش

به‌منظور ارزیابی تأثیر سالیسیلیک‌اسید بر کارایی فتوستتزی و ترکیب اسیدهای چرب دانه گلرنگ زراعی تحت تنش گرمای آخر فصل در مراحل زایشی، این پژوهش در سال زراعی ۱۳۹۸-۱۳۹۷ در مزرعه آموزشی گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی دانشگاه شهید چمران اهواز به‌صورت اسپلیت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام گرفت. دو تاریخ کاشت به‌هنگام و دیرهنگام (به‌ترتیب ۲۰ آذرماه و ۳۰ دی‌ماه) در کرت‌های اصلی، محلول‌پاشی غلظت‌های هورمون سالیسیلیک‌اسید (شاهد و ۴۰۰ میکرومولار در لیتر) و ارقام (رقم پرریان به‌عنوان رقم حساس به گرما و رقم فرامان به‌عنوان رقم متحمل به گرما) (صالحی و همکاران، ۱۳۹۸) نیز به‌صورت فاکتوریل در کرت‌های فرعی قرار گرفت. در تاریخ کاشت دیرهنگام مراحل زایشی گیاه با تنش گرمای آخر فصل مواجه شد. بذره‌ای مورد استفاده از مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج تهیه شدند. پیش از شروع آزمایش، نمونه‌برداری تصادفی خاک از عمق‌های صفر-۲۰

1. Khan
2. Ma
3. Prasertthai
4. Kachroo

و ۲۰-۴۰ سانتی متری انجام شد و تجزیه فیزیکی و شیمیایی خاک مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت (جدول ۱). هم چنین، برخی اطلاعات آب و هوایی منطقه در طول دوره کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک گیاه، در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۱. نتایج تجزیه فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش (عمق صفر تا ۴۰ سانتی متر)

عمق خاک (سانتی متر)	بافت خاک	هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر)	ظرفیت زراعی (درصد)	نقطه پژمردگی (درصد)	مواد آلی (درصد)	فسفر (میلی گرم بر کیلوگرم)	پتاسیم (میلی گرم بر کیلوگرم)	اسیدیته
۰-۲۰	لومی-شنی	۴/۸	۳۲/۱	۷/۶	۶۵/۱	۸/۳	۱۶۹/۱	۷/۶
۲۰-۴۰	لومی-شنی	۵	۲۰/۲	۸/۱	۴۱/۱	۱۰/۵	۱۶۴/۲	۸/۶

جدول ۲. میزان بارندگی ماهیانه، حداکثر و حداقل درجه حرارت، رطوبت نسبی و تبخیر در طول فصل رشد (۹۸-۱۳۹۷)

ماه	درجه حرارت (درجه سانتی گراد)		رطوبت نسبی (درصد)	تبخیر (میلی متر در روز)	بارش (میلی متر)
	حداکثر	حداقل			
آذر	۲۵/۳	۱۳/۲	۳۴/۲	۴/۴	۳۵
دی	۱۸/۵	۵/۸	۴۷/۸	۲/۱	۶۸
بهمن	۱۷/۸	۷/۱	۴۷/۶	۲	۳۳
اسفند	۲۴/۴	۱۱/۲	۴۱/۳	۳/۱	۱۲
فروردین	۳۱/۳	۱۵/۱	۴۰/۲	۵/۲	۸
اردیبهشت	۳۳/۱	۲۱/۴	۴۲/۲	۹/۵	۹
خرداد	۴۵/۲	۲۹/۴	۴۲/۳	۱۴/۵	۰

آمار ایستگاه هواشناسی دانشگاه شهید چمران اهواز.

براساس نتایج آزمون خاک مزرعه، ۱۲۰ کیلوگرم کود نیتروژن در هکتار (۶۰ کیلوگرم هنگام کاشت و ۶۰ کیلوگرم در دو مرحله ریز و آغاز گلدهی) از منبع اوره، ۸۵ کیلوگرم کود فسفر در هکتار از منبع سوپرفسفات تریپل و ۲۵ کیلوگرم کود پتاسیم در هکتار از منبع سولفات پتاسیم، پیش از کاشت مصرف شد. کرت های آزمایشی شامل ۱۰ خط کاشت به طول ۲/۵ متر با فاصله ۵۰ سانتی متر بین ردیف ها و ۱۵ سانتی متر فاصله روی ردیف بودند. بذور پس از ضد عفونی با قارچ کش گرانوزان به صورت تناوبی در دو طرف پشته کشت شدند. آبیاری به صورت کرتی انجام شد؛ آبیاری اول بلافاصله پس از کاشت و آبیاری های بعدی پس از رسیدن رطوبت خاک به حدود ۸۰ درصد ظرفیت زراعی ادامه یافت و تا پایان فصل رشد تکرار شد. برای تعیین ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم، ابتدا نمونه های اشباع خاک با استفاده از صفحات فشاری در مکش های ۰/۳ و ۱۵ بار قرار گرفتند و درصد رطوبت وزنی خاک در هر دو مکش اندازه گیری شد. سپس با توجه به وزن مخصوص ظاهری خاک، درصد رطوبت حجمی در هر مکش تعیین و مقدار آب قابل استفاده خاک بین این دو نقطه محاسبه گردید. در طول دوره رشد، درصد رطوبت حجمی خاک به صورت روزانه با دستگاه رطوبت سنج (مدل ProCheck, Decagon Devices, USA) اندازه گیری شد و آبیاری هر بار با رسیدن رطوبت خاک در ناحیه ریشه به ۸۰ درصد آب قابل استفاده انجام گرفت.

سطوح تیماری سالیسیلیک/اسید به صورت دو محلول پاشی در دو نوبت پس از خروج از مرحله ریز و ۳۰-۳۱ براساس مقیاس BBCH) و ابتدای دوره گلدهی (مرحله ۶۰-۶۱ براساس مقیاس BBCH) اعمال شد. میزان محلول پاشی براساس محاسبه هزار لیتر محلول برای هر هکتار و نیاز هر کرت آزمایشی، به طور متوسط یک لیتر محلول پاشی به صورت اسپری انجام گرفت. تاریخ های دقیق محلول پاشی در جدول (۳) آورده شده است.

جدول ۳. زمان های محلول پاشی هورمون سالیسیلیک/اسید در شرایط مزرعه (۹۸-۱۳۹۷)

زمان محلول پاشی	تیمار شاهد دمایی	تیمار تنش دمایی
پس از خروج از مرحله ریز و ابتدای مرحله گلدهی	۱۳۹۷/۱۲/۳	۱۳۹۸/۰۱/۱۷
	۱۳۹۷/۰۲/۳	۱۳۹۷/۰۲/۱۹

۲.۳. فتوستنز و تبادلات گازی

سرعت فتوستنز خالص، هدایت روزنه‌ای، غلظت دی‌اکسیدکربن زیر روزنه‌ای و شدت تعرق در آغاز مرحلهٔ پرشدن دانه با استفاده از دستگاه تحلیل‌گر گازی مادون‌قرمز (ADC, Hoddeston UK, model LCA4) بین ساعت ۹ صبح تا ۱۲ ظهر روزهای صاف و آفتابی بر روی آخرین برگ‌های توسعه‌یافتهٔ سه بوته اندازه‌گیری شد. برای این منظور قسمت میانی برگ در اتاقک شیشه‌ای دستگاه قرار داده شد و پس از ۴۵ ثانیه که شرایط درون اتاقک به حالت ثبات رسید (فیشر^۱ و همکاران، ۱۹۹۸)، قرائت انجام شد.

کارایی کربوکیسلاسیون یا هدایت مزوفیلی نیز با تقسیم فتوستنز خالص بر غلظت دی‌اکسیدکربن زیرروزنه‌ای به‌دست آمد (فیشر و همکاران، ۱۹۹۸).

رابطه (۱) $CE = P_n / C_i$

در این رابطه، P_n فتوستنز خالص و C_i میزان دی‌اکسیدکربن بین‌سلولی می‌باشد. کارایی مصرف آب فتوستنزی (PWUE) نیز براساس رابطه (۲) محاسبه گردید (مدرانو^۲ و همکاران، ۲۰۱۵).

رابطه (۲) $PWUE = P_n / T$

که در آن، T نماد شدت تعرق می‌باشد.

۳.۳. شاخص کلروفیل

شاخص کلروفیل نیز در آغاز مرحلهٔ پرشدن دانه، با استفاده از دستگاه کلروفیل‌متر (Monilota SPAD-502 Chlorophyll meter, Japan) در پنج نقطه از برگ‌های توسعه‌یافتهٔ انتهایی سه بوته از وسط هر کرت آزمایشی انجام و میانگین مقادیر ثبت شد.

۴.۳. عملکرد دانه

برداشت در تاریخ کاشت به‌هنگام در اوایل خردادماه (۴ خردادماه) و در تاریخ کاشت دیر هنگام اواسط خردادماه (۱۲ خردادماه) انجام شد. تفاوت زمانی برداشت دو تاریخ کاشت هشت روز بود. در زمان رسیدگی کامل دانه‌ها و رسیدن رطوبت دانه به حدود ۱۰ درصد، نمونه‌برداری عملکرد دانه و زیست‌توده با رعایت اثر حاشیه از مساحت یک مترمربع در هر واحد آزمایشی انجام و محاسبه شد.

۵.۳. خصوصیات کمی و کیفی دانه

۵.۳.۱. درصد روغن دانه

برای اندازه‌گیری درصد روغن دانه، از دستورالعمل انجمن رسمی شیمی‌دانان تجزیه (AOAC, 1993) استفاده شد. ابتدا نمونه‌های بذری آسیاب شده و سپس به‌منظور حذف رطوبت اضافی، به‌مدت دو ساعت درون آون قرار گرفتند. پس از خشک‌شدن، نمونه‌ها وزن شده و جهت استخراج روغن در دستگاه سوکسله (FOSS, Model SOCCET 2050) قرار گرفتند. در این مرحله، با استفاده از حلال N-هگزان، روغن موجود در نمونه‌ها استخراج گردید. در نهایت، با محاسبهٔ اختلاف وزن نمونه‌ها پیش و پس از روغن‌گیری، درصد روغن دانه تعیین شد. عملکرد روغن نیز از حاصلضرب عملکرد دانه در درصد روغن دانه محاسبه شد.

۳.۵.۲. درصد پروتئین دانه

برای اندازه‌گیری درصد پروتئین دانه، از نمونه‌های آسیاب‌شده مقدار یک گرم انتخاب شد. این نمونه‌ها با استفاده از روش کج‌دال، تحت فرایند هضم و تبخیر در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت قرار گرفتند. پس از اتمام هضم، به هر نمونه ۵۰ سی‌سی آب اضافه شد و برای اندازه‌گیری درصد نیتروژن، نمونه‌ها در دستگاه اتوانالایزر قرار گرفتند. مقادیر به‌دست‌آمده از قرائت نیتروژن در عدد ۶/۲۵ ضرب شده و درصد پروتئین دانه محاسبه گردید. عملکرد پروتئین نیز از حاصلضرب عملکرد دانه در درصد پروتئین دانه محاسبه شد.

۳.۶. ترکیب اسیدهای چرب دانه

ترکیب اسیدهای چرب موجود در نمونه روغن براساس دستورالعمل انجمن رسمی شیمیدانان تجزیه (AOAC, 1999) و با استفاده از دستگاه کروماتوگرافی گازی (GC) (ساخت کارخانه دنی، مدل ۲۰۰۰)، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. جداسازی و تعیین کمیت اسیدهای چرب با استفاده از ستونی با مشخصات محصول شرکت ساپل، نوع ستون WAX، مدل BPX-70، با طول ۱۲۰ متر، قطر داخلی ۰/۲۵ میلی‌متر و ضخامت فیلم ۰/۲۵ میکرومتر انجام شد. در این مطالعه، از گاز نیتروژن به‌عنوان حامل استفاده شد. دماهای تنظیم‌شده برای تزریق‌کننده، آشکارساز و آون به‌ترتیب برابر با ۲۵۰، ۲۲۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد بودند. عمده اسیدهای چرب شناسایی‌شده شامل اسیدهای چرب غیراشباع، به‌ویژه اسید اولئیک و اسید لینولئیک بودند. سایر اسیدهای چرب، که به‌طور عمده شامل اسید پالمیتیک و استئاریک اسید می‌باشند، به‌عنوان اسیدهای چرب اشباع طبقه‌بندی شدند. نتایج به‌صورت درصدی از کل محتوای روغن بیان گردید.

۳.۷. محاسبات آماری

پیش از انجام محاسبات آماری، نرمال‌بودن داده‌ها با استفاده از آزمون شاپیرو-ویلک بررسی شد که نتایج آن نشان داد تمامی داده‌ها از نظر آماری از توزیع نرمال برخوردار بودند. تجزیه واریانس داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS (نسخه ۹.۳) (SAS Institute, 2012) انجام گرفت. مقایسه میانگین‌ها با آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD)^۱ در سطح احتمال ۵ درصد صورت پذیرفت.

۴. یافته‌های پژوهش

۴.۱. سرعت فتوسنتز

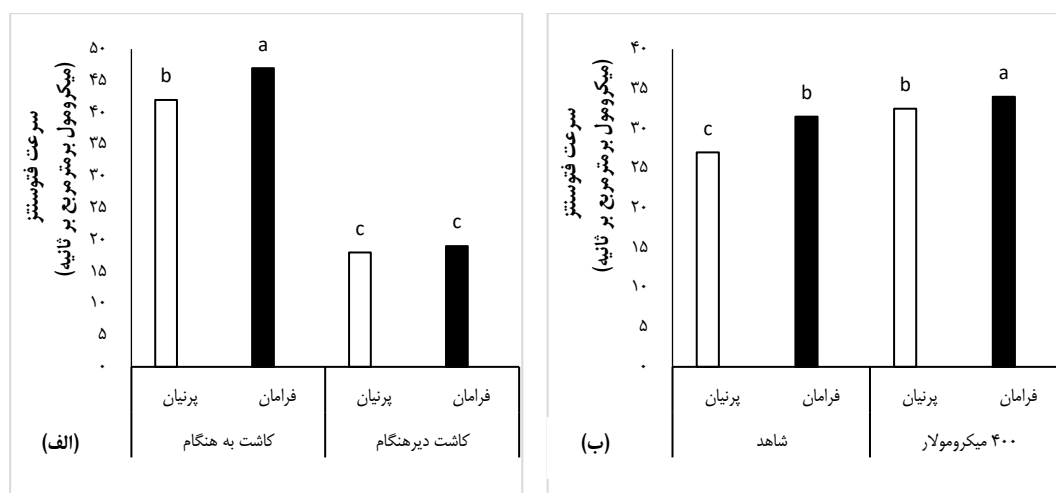
اثرات ساده تاریخ کاشت، رقم، محلول پاشی و هم‌چنین برهم‌کنش دوگانه محلول پاشی در رقم و تاریخ کاشت × رقم بر سرعت فتوسنتز معنی‌دار بود (جدول ۴). بررسی روند تغییرات برهم‌کنش‌ها نشان داد سرعت فتوسنتز در تاریخ کاشت به‌هنگام در رقم فرامان بالاتر از رقم پرنیان بود. سرعت فتوسنتز هر دو رقم مورد مطالعه در تاریخ کاشت دیر هنگام کاهش یافت (شکل ۱-الف). از سوی دیگر، کاربرد سالیسیلیک اسید در هر دو تاریخ کاشت سبب بهبود سرعت فتوسنتز در هر دو رقم شد اما رقم فرامان واکنش مناسب‌تری نسبت به رقم پرنیان در شرایط دمای بالا داشت (شکل ۱-ب) که علت این امر را می‌توان به واکنش هم‌زمان توانایی‌های ژنتیکی این رقم متحمل و نقش بهبوددهنده سالیسیلیک اسید دانست.

1. Least significant difference

جدول ۴. میانگین مربعات ویژگی‌های فتوسنتزی و عملکردی ارقام گلرنگ در تاریخ‌های مختلف کاشت و محلول‌پاشی هورمون سالیسیلیک‌اسید

منابع تغییر	درجه آزادی	سرعت فتوسنتز	هدایت روزنه‌ای	غلظت دی‌اکسیدکربن زیر روزنه	شدت تعرق
بلوک	۲	۲۴/۲	۰/۰۰۰۰۴	۰/۸۱	۹/۹۸
تاریخ کاشت	۱	۷۹۲۳**	۱/۶۴**	۱۷۷۴**	۶۷۳**
خطای a	۲	۷/۸۰	۰/۰۰۱۳	۲/۶۳	۱/۰۴
هورمون	۱	۴۳۰**	۰/۰۸۷۴**	۱۰۹/۲**	۵۸۷۳**
رقم	۱	۱۳۳**	۰/۲۹۷۷**	۲۰۹**	۱۱۳۵**
تاریخ کاشت × هورمون	۱	۸/۲۱ns	۰/۰۰۵۹*	۰/۲۹ns	۱۱۵**
تاریخ کاشت × رقم	۱	۵۴**	۰/۰۳۷۳**	۲۱/۹*	۴۲/۴ns
هورمون × رقم	۱	۴۶/۸**	۰/۰۰۶۷ns	۹/۱۸ns	۵/۳۰ns
تاریخ کاشت × هورمون × رقم	۱	۸/۱۹ns	۰/۰۰۶۲**	۹۲۸**	۹۶/۱**
خطای b	۱۲	۱۰/۱	۰/۰۰۰۸	۴/۶۹	۱۵/۱
ضریب تغییرات (درصد)		۱۸/۸۴	۸/۶۹	۶/۹۹	۹/۲۴
منابع تغییر	درجه آزادی	کربوکسیلاسیون کارایی	کارایی مصرف آب فتوسنتزی	شاخص کلروفیل	عملکرد دانه
بلوک	۲	۰/۰۲۱۹	۰/۰۱۲۳۵	۶/۰۲	۱۶۸۰۹
تاریخ کاشت	۱	۴/۱۳**	۵/۶۶**	۱۶۱۹**	۸۵۳۲۶۹۵**
خطای a	۲	۰/۰۱۹۹	۰/۰۰۰۴	۳/۸۹	۴۷۵۹۴
هورمون	۱	۰/۱۵۲۳*	۰/۱۴۴۶۵**	۱۷۵۸**	۴۲۳۱۵۰۰**
رقم	۱	۰/۵۴۶۶**	۰/۴۳۳۵۴**	۱۵۵۹**	۱۴۷۹۵ns
تاریخ کاشت × هورمون	۱	۰/۰۰۰۱ns	۰/۱۶۶۷۹**	۶۱/۳ns	۲۶۲۱۹۰ns
تاریخ کاشت × رقم	۱	۰/۰۰۱۸ns	۰/۱۴۰۰۶**	۱۲۷ns	۲۳۳۱۴۹ns
هورمون × رقم	۱	۰/۰۹۳۵ns	۰/۰۰۰۱۴ns	۱۱۹ns	۵۸۹۵۴ns
تاریخ کاشت × هورمون × رقم	۱	۰/۸۱۱۴**	۰/۰۲۱۰۶*	۴۷/۲ns	۳۵۳۴۴۴*
خطای b	۱۲	۰/۰۲۶۸	۰/۰۰۶۲۵	۳۲/۱۰	۶۴۳۲۱
ضریب تغییرات (درصد)		۸/۵۲	۱۵/۸۹	۱۴/۲۲	۱۱/۳۰

ns، * و **: به‌ترتیب عدم معنی‌دار، معنی‌دار در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد براساس آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD).



شکل ۱. مقایسه میانگین برهم‌کنش تاریخ کاشت و رقم (الف) و محلول‌پاشی و رقم (ب) بر سرعت فتوسنتز گیاه گلرنگ

۲.۴. هدایت روزنه‌ای

نتایج تجزیه واریانس حاکی از آن بود که اثرات ساده تاریخ کاشت، رقم، محلول پاشی و همچنین اثر دوگانه تاریخ کاشت × محلول پاشی و تاریخ کاشت × رقم، و اثرات سه گانه تاریخ کاشت × رقم × محلول پاشی بر هدایت روزنه‌ای معنی‌دار بود (جدول ۴). روند تغییرات هدایت روزنه‌ای نشان داد که هدایت روزنه‌ای در هر دو رقم با تأخیر در کاشت کاهش یافت، و میزان هدایت روزنه‌ای هر دو رقم در سطح ۴۰۰ میلی‌مولار سالیسیلیک/اسید در هر دو تاریخ کاشت به مراتب بالاتر از تیمار عدم محلول پاشی این ارقام بود. در تمام تیمارهای مورد مطالعه نیز میزان هدایت روزنه‌ای در رقم فرامان به مراتب بیش‌تر از رقم پرنیان بود. بالاترین میزان هدایت روزنه‌ای در رقم فرامان در تاریخ کشت به‌هنگام و محلول پاشی سالیسیلیک/اسید (۷۱۱ میلی‌مول بر مترمربع در ثانیه) و کم‌ترین میزان در رقم پرنیان در تاریخ کشت دیر هنگام در شرایط عدم محلول پاشی (۱۸۰ میلی‌مول بر مترمربع در ثانیه) مشاهده شد (جدول ۵).

۳.۴. غلظت دی‌اکسیدکربن زیر روزنه

اثرات ساده تاریخ کاشت، رقم، محلول پاشی و همچنین اثر دوگانه تاریخ کاشت × رقم، و اثرات سه گانه تاریخ کاشت × رقم × محلول پاشی بر غلظت دی‌اکسیدکربن زیر روزنه معنی‌دار بود (جدول ۴). مقادیر غلظت دی‌اکسیدکربن زیر روزنه در هر دو رقم با تأخیر در کاشت کاهش یافت و مقادیر آن در هر دو رقم در تیمار محلول پاشی در هر دو تاریخ کاشت به مراتب بالاتر از تیمار عدم محلول پاشی بود. در هر دو تاریخ کاشت نیز میزان دی‌اکسیدکربن زیر روزنه در رقم پرنیان به مراتب بیش‌تر از فرامان بود. بالاترین غلظت دی‌اکسیدکربن زیر روزنه در رقم پرنیان در تاریخ کشت به‌هنگام و تیمار شاهد (۴۹ میلی‌مول بر مول هوا) و کم‌ترین میزان در رقم فرامان در تاریخ کشت دیر هنگام در تیمار محلول پاشی (۱۳ میلی‌مول بر مول هوا) مشاهده شد (جدول ۵).

جدول ۵. مقایسه میانگین برهم کنش تاریخ کاشت × رقم × محلول پاشی سالیسیلیک/اسید بر ویژگی‌های فتوسنتزی و عملکردی ارقام گلرنگ

تاریخ کاشت	رقم	محلول پاشی سالیسیلیک/اسید	هدایت روزنه‌ای (میلی‌مول بر مترمربع بر ثانیه)	غلظت دی‌اکسید کربن زیر روزنه (میکرومول بر مول هوا)	شدت تعرق (میلی‌مول بر مترمربع بر ثانیه)	کارایی کربوکسیلاسیون (میلی‌مول بر مترمربع بر ثانیه)	کارایی مصرف آب فتوسنتزی (میکرومول CO ₂ بر میلی‌مول H ₂ O)	عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)
به‌هنگام	پرنیان	شاهد	۵۱۰c	۴۹a	۳۷/۴۸e	۰/۸۶۰bc	۰/۷۹b	۲۲۱۹bc
		۴۰۰ پی پی ام	۴۹۰c	۴۷a	۵۲/۳۱b	۰/۹۶۴ab	۰/۶۲c	۳۶۰۹a
	فرامان	شاهد	۶۱۰b	۲۶d	۳۱/۳۹f	۱/۰۳۴a	۱/۳۰a	۲۴۱۳b
		۴۰۰ پی پی ام	۷۱۱a	۳۱c	۴۸/۴۷c	۱/۰۷۹a	۰/۶۴c	۳۱۲۰a
دیر هنگام	پرنیان	شاهد	۱۸۰f	۳۲c	۴۳/۸۳d	۰/۵۸۶d	۰/۳۸d	۱۲۸۱e
		۴۰۰ پی پی ام	۲۸۰e	۴۰b	۵۷/۸۲a	۰/۵۱۵d	۰/۲۴e	۱۷۶۸d
	فرامان	شاهد	۳۲۰e	۲۳e	۳۸/۴۵e	۰/۵۷۳d	۰/۲۷e	۱۳۸۴e
		۴۰۰ پی پی ام	۳۷۵d	۱۳f	۴۸/۵۱c	۰/۷۸۲c	۰/۴۰d	۲۱۵۸c

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون براساس آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

۴.۴. شدت تعرق

اثرات ساده تاریخ کاشت، رقم، محلول‌پاشی و همچنین اثر دوگانه تاریخ کاشت × محلول‌پاشی و سه‌گانه تاریخ کاشت × رقم × محلول‌پاشی بر سرعت تعرق معنی‌دار بود (جدول ۴). سرعت تعرق در تاریخ کاشت دیر هنگام در هر دو رقم و هر دو سطح محلول‌پاشی بالاتر از تاریخ کشت به هنگام بود، به‌نحوی که در کاشت دیر هنگام سرعت تعرق در شرایط عدم محلول‌پاشی در رقم پر نیان و فرامان به‌ترتیب ۱۶/۹ و ۲۲/۵ درصد و در شرایط محلول‌پاشی به‌ترتیب ۱۰/۵ و ۰/۰۸ درصد نسبت به تاریخ کشت به هنگام افزایش یافت. همچنین نتایج حاکی از آن بود که بالاترین سرعت تعرق در تاریخ کشت دیر هنگام در رقم پر نیان تحت تیمار محلول‌پاشی (۵۷/۸ میکرومول بر مترمربع در ثانیه) و پایین‌ترین میزان آن در تاریخ کشت به هنگام در رقم فرامان در شرایط عدم محلول‌پاشی (۳۱/۴ میکرومول بر مترمربع در ثانیه) به‌دست آمد (جدول ۵). افزایش میزان تعرق در ارقام گلرنگ زراعی مورد مطالعه در این تحقیق در واکنش به تنش دمای بالا می‌تواند به‌دلیل عدم سازگاری گیاه با شرایط محیطی و بسته‌شدن روزنه‌ها در واکنش به شوک گرمای تدریجی باشد که با محلول‌پاشی سالیسیلیک‌اسید تا حدودی این روند کند شده است.

۴.۵. کارایی کربوکسیلاسیون

اثرات ساده تاریخ کاشت، رقم، محلول‌پاشی و اثرات سه‌گانه تاریخ کاشت × رقم × محلول‌پاشی بر غلظت دی‌اکسیدکربن زیر روزنه معنی‌دار بود (جدول ۴). تأخیر در کاشت موجب کاهش کارایی کربوکسیلاسیون نسبت به کاشت به‌هنگام شد، به‌نحوی که در رقم پر نیان در شرایط شاهد و محلول‌پاشی به‌ترتیب ۳۱/۹ و ۴۵/۶ درصد و در رقم فرامان در شرایط شاهد و محلول‌پاشی به‌ترتیب ۴۴/۵۸ و ۲۷/۵۲ درصد کارایی کربوکسیلاسیون تحت تنش گرمای ناشی از تأخیر در کاشت نسبت به شرایط عدم تنش کاهش یافت. بالاترین کارایی کربوکسیلاسیون نیز در تیمار شاهد تنش گرمایی و رقم فرامان تحت تیمار محلول‌پاشی (۱/۰۷۹ میکرومول بر مترمربع در ثانیه) و پایین‌ترین میزان آن در رقم پر نیان تحت تیمار محلول‌پاشی در کاشت دیر هنگام (۰/۵۱۵ میکرومول بر مترمربع در ثانیه) مشاهده گردید (جدول ۵).

۴.۶. کارایی مصرف آب فتوسنتزی

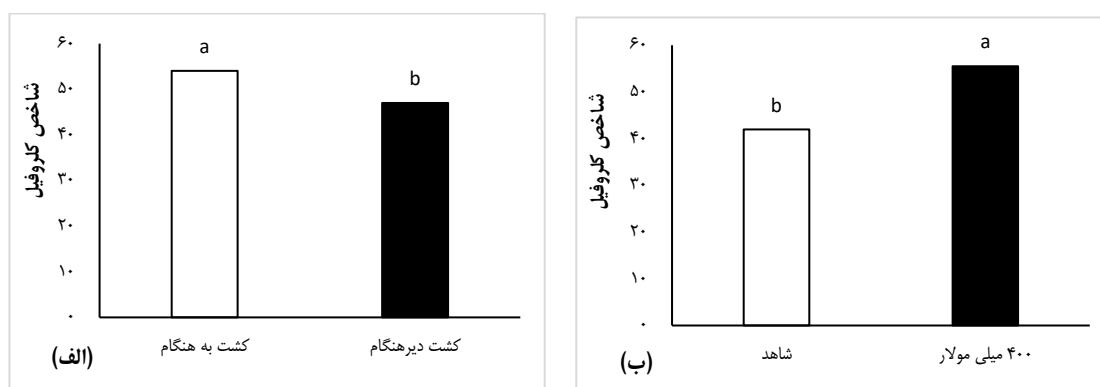
به‌جز اثرات دوگانه محلول‌پاشی × رقم، تمامی اثرات ساده و برهم‌کنش‌ها بر کارایی مصرف آب فتوسنتزی معنی‌دار بود (جدول ۴). کارایی مصرف آب فتوسنتزی در کشت به‌هنگام بیش‌تر از کاشت دیر هنگام بود. بیش‌ترین مقدار این صفت در شرایط کشت به‌هنگام در رقم فرامان تحت شرایط عدم کاربرد محلول‌پاشی (۱/۳۰ میکرومول CO_2 بر میلی‌مول H_2O) و کم‌ترین مقدار آن نیز در رقم پر نیان در کاشت دیر هنگام و شرایط محلول‌پاشی حاصل گردید (۰/۲۴ میکرومول CO_2 بر میلی‌مول H_2O) (جدول ۵).

۴.۷. شاخص کلروفیل

کلیه اثرات ساده تاریخ کاشت، رقم و محلول‌پاشی از نظر شاخص کلروفیل در سطح احتمال یک درصد تفاوت معنی‌داری داشتند (جدول ۴). تأخیر در کاشت و مواجهه با دماهای بالا سبب کاهش معنی‌دار شاخص کلروفیل گردید (شکل ۲-الف). از سوی دیگر محلول‌پاشی سالیسیلیک‌اسید سبب بهبود شاخص کلروفیل در مقایسه با شرایط شاهد شد (شکل ۲-ب). رقم فرامان در مقایسه با رقم پر نیان دارای شاخص کلروفیل بالاتری بود.

کاهش شاخص کلروفیل تحت شرایط تنش گرما به‌دلیل تولید گونه‌های اکسیژن‌های واکنش‌گر و اثرات آسیب‌زای آن‌ها

می باشد. این رادیکال های آزاد سبب پراکسیداسیون، تجزیه و کاهش کلروفیل تحت شرایط تنش می شوند. همچنین افزایش میزان اتیلن و فعالیت آنزیم پراکسیداز در طی تنش ممکن است یکی از عوامل مؤثر بر کاهش غلظت کلروفیل برگ و شاخص سبزیگی آن باشد. در شرایطی که دمای محیط مزرعه در حد مطلوب باشد، تنوع زیادی بین ارقام از لحاظ سرعت کاهش کلروفیل مشاهده نمی شود. از این رو، استفاده از میزان عدد سبزیگی برگ برای ارزیابی تحمل به گرما موفقیت آمیز است. در آزمایش حاضر، در شرایط تنش گرمای ناشی از کاشت دیر هنگام، با وجود کاهش شاخص کلروفیل، ارقام از درصد کاهش عملکرد دانه پایی بر خوردار بودند که دلیل آن کارایی رقم های مذکور در استفاده از شرایط محیطی بود.



شکل ۲. مقایسه میانگین اثرات ساده تاریخ کاشت و محلول پاشی سالیسیلیک/اسید بر شاخص کلروفیل گلرنگ

۴.۸. عملکرد دانه

اثرات ساده تاریخ کاشت و محلول پاشی در سطح یک درصد و اثرات سه گانه تاریخ کاشت × رقم × محلول پاشی در سطح یک درصد بر عملکرد دانه معنی دار بود (جدول ۴). تأخیر در کاشت موجب کاهش عملکرد دانه در هر دو رقم مورد مطالعه شد، اما کاربرد سالیسیلیک/اسید تا حدودی توانست اثرات منفی ناشی از تنش گرما بر عملکرد دانه را خنثی کند. به نحوی که در تیمار تنش گرمایی به ترتیب در ارقام پر نیان و فرامان کاربرد سالیسیلیک/اسید توانست میزان عملکرد دانه را ۳۸ و ۵۶ درصد بهبود بخشد. همچنین کاربرد سالیسیلیک/اسید در شرایط مطلوب دمایی نیز موجب افزایش عملکرد دانه در هر دو رقم مورد مطالعه گردید (جدول ۵). بالاترین میزان عملکرد دانه در رقم پر نیان در کاشت به هنگام و محلول پاشی سالیسیلیک/اسید (۳۶۰۹ کیلوگرم در هکتار) مشاهده گردید که تفاوت معنی داری با رقم فرامان تحت همین تیمارها (۳۱۲۰ کیلوگرم در هکتار) نداشت. همچنین پایین ترین میزان عملکرد دانه در رقم پر نیان در کاشت دیر هنگام و تحت تیمار عدم کاربرد سالیسیلیک/اسید (۱۲۸۱ کیلوگرم در هکتار) به دست آمد (جدول ۵).

۴.۹. پروفایل اسیدهای چرب

بنابر نتایج تجزیه واریانس، برهم کنش سه گانه تاریخ کاشت × محلول پاشی × رقم بر صفات مرتبط با کیفیت روغن معنی دار بود (جدول ۶). بررسی پروفایل اسیدهای چرب نشان داد که اسید اولئیک، لینولئیک/اسید، اسید پالمیتیک و اسید استئاریک، اسیدهای چرب عمده در نمونه های مورد بررسی بودند و در مجموع بیش از ۹۰ درصد کل میزان روغن را تشکیل دادند. تنوع نسبتاً بالایی در ترکیب اسیدهای چرب ارقام گلرنگ مورد بررسی مشاهده شد. نتایج حاکی از آن بود که در کاشت به هنگام در هر دو رقم و هر دو سطح کاربرد و عدم کاربرد سالیسیلیک/اسید، لینولئیک/اسید و در شرایط کاشت دیر هنگام لینولئیک/اسید، اسیدهای چرب عمده روغن را تشکیل دادند.

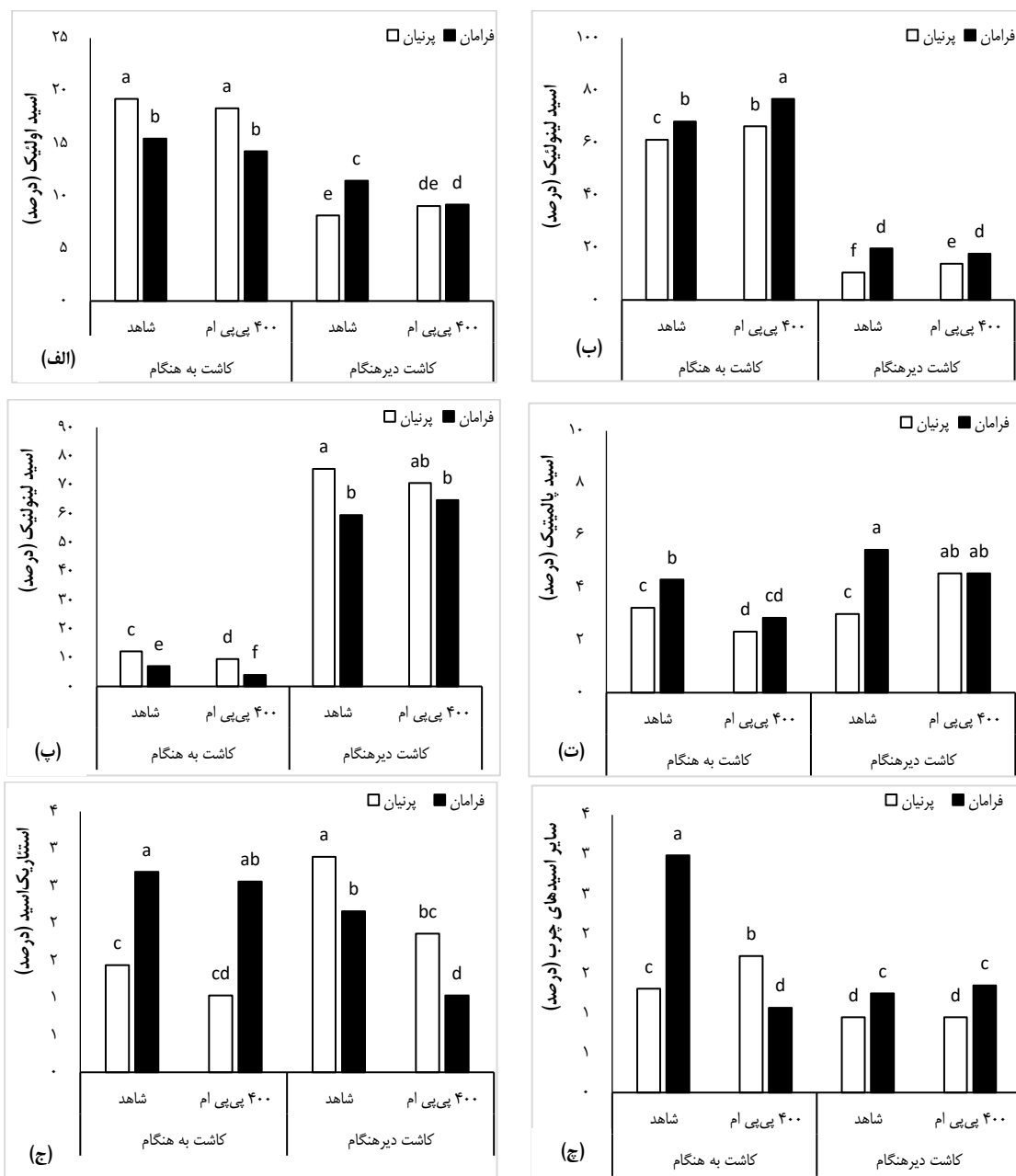
جدول ۶. میانگین مربعات ترکیب اسیدهای چرب ارقام گلرنگ در تاریخ‌های مختلف کاشت و محلول‌پاشی سالیسیلیک‌اسید

منابع تغییر	درجه آزادی	اولئیک اسید	لینولئیک اسید	لینولئیک اسید	پالمیتیک اسید	استئاریک اسید	سایر اسیدهای چرب
بلوک	۲	۰/۶۳	۳/۴۶	۱۹/۴	۰/۰۲۶	۰/۰۰۹۱	۰/۰۱۳۲
تاریخ کاشت	۱	۳۲۴**	۱۶۶۵.۰**	۲۱۲۶۵**	۸/۷۸**	۰/۰۱۸۱ns	۲/۵۶**
خطای a	۲	۰/۱۴	۷/۴۵	۱۳/۵	۰/۰۵۳	۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۴۶
هورمون	۱	۴/۵۰*	۸۶/۱**	۱۲/۷۹ns	۱/۱۱ns	۲/۷۳**	۰/۷۶۳**
رقم	۱	۷/۳۹**	۳۴۵**	۴۰۶/۸**	۶/۲۱**	۰/۵۵۸۱**	۱/۱۴**
تاریخ کاشت × هورمون	۱	۰/۱۸ns	۵۸/۹**	۱۱/۸ns	۳/۴۳**	۰/۹۷۶۰**	۰/۹۵۲۰**
تاریخ کاشت × رقم	۱	۴۸/۱**	۷/۶۵ns	۵۱/۱*	۰/۲۶۹ns	۷/۰۴**	۰/۰۳۶۸ns
هورمون × رقم	۱	۴/۶۳*	۱/۰۶ns	۳۹/۱*	۳/۳۷۵**	۰/۰۱۱۲ns	۱/۸۲**
تاریخ کاشت × هورمون × رقم	۱	۳/۰۸*	۲۹/۹*	۴۴/۳*	۱/۲۵۴*	۰/۰۵۴۱*	۲/۲۵**
خطای b	۱۲	۰/۵۷	۴/۸۲	۵/۵۸	۰/۲۴۶	۰/۰۰۸۸	۰/۰۳۰۶
ضریب تغییرات (درصد)		۵/۷۴	۵/۲۷	۶/۲۳	۱۳/۰۸	۴/۸۲	۱۲/۰۹

ns و **: به ترتیب عدم معنی‌دار، معنی‌دار در سطح احتمال یک و پنج درصد براساس آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD).

بیش‌ترین میزان اسیداولئیک در کاشت به‌هنگام در رقم پرنیان تحت تیمارهای عدم کاربرد (۱۹/۲ درصد) و کاربرد سالیسیلیک‌اسید (۱۸/۳ درصد) حاصل شد. کم‌ترین میزان این اسید چرب نیز طی کاشت دیرهنگام در شرایط عدم کاربرد سالیسیلیک‌اسید در رقم پرنیان (۸/۱ درصد) مشاهده شد (شکل ۳-الف). رقم پرنیان دارای درصد بیش‌تری اسیداولئیک در شرایط مطلوب دمایی در هر دو تیمار محلول‌پاشی بود، اما در شرایط کشت دیرهنگام رقم فرامان درصد بیش‌تری از این اسیدچرب را در تیمار عدم محلول‌پاشی نسبت به رقم دیگر داشت (شکل ۳-الف).

تنش گرمای ناشی از کشت دیرهنگام سبب کاهش قابل‌توجه درصد لینولئیک‌اسید شد. محلول‌پاشی سالیسیلیک‌اسید در هر دو تاریخ کاشت سبب افزایش درصد لینولئیک‌اسید در هر دو رقم شد. بیش‌ترین مقدار این اسید چرب در رقم فرامان تحت تیمار سالیسیلیک‌اسید در شرایط دمایی مطلوب (۷۶/۸ درصد) و کم‌ترین مقدار آن در رقم پرنیان بدون کاربرد سالیسیلیک‌اسید در شرایط تنش شدید گرما (۱۰/۵ درصد) مشاهده شد (شکل ۳-ب). نتایج مربوط به صفت لینولئیک‌اسید متفاوت از سایر اسیدهای چرب بود، به‌گونه‌ای که مشخص شد با تأخیر در کاشت، میزان این اسید چرب در هر دو رقم به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافت. بیش‌ترین مقدار لینولئیک‌اسید در رقم پرنیان، در شرایط عدم کاربرد سالیسیلیک‌اسید و کشت دیرهنگام به‌دست آمد (۷۵/۹ درصد). در مقابل، کم‌ترین مقدار این اسید چرب در رقم فرامان، تحت شرایط کشت به‌هنگام و کاربرد سالیسیلیک‌اسید (۹/۵ درصد) مشاهده شد (شکل ۳-پ). در مورد اسیدچرب پالمیتیک نیز نتایج حاکی از آن بود که در کاشت به‌هنگام بالاترین میزان این اسید چرب در رقم فرامان تحت تیمار عدم کاربرد سالیسیلیک‌اسید (۴/۳۲ درصد) و پایین‌ترین میزان آن در رقم پرنیان تحت تیمار کاربرد سالیسیلیک‌اسید (۲/۳۳ درصد) مشاهده شد. در شرایط کشت دیرهنگام نیز بالاترین میزان در رقم فرامان تحت تیمار عدم کاربرد سالیسیلیک‌اسید (۵/۴۶ درصد) حاصل گردید که البته اختلاف معنی‌داری با تیمار سالیسیلیک‌اسید در ارقام پرنیان و فرامان (۴/۵۶ درصد) نداشت، و پایین‌ترین میزان در شرایط کشت دیرهنگام مربوط به رقم پرنیان تحت تیمار عدم کاربرد سالیسیلیک‌اسید (۳/۰۱ درصد) به‌دست آمد (شکل ۳-ت). نتایج مقایسه میانگین تیمارهای مورد مطالعه بر استئاریک‌اسید نشان داد که در شرایط کشت به‌هنگام بیش‌ترین و کم‌ترین درصد اسیداستئاریک به‌ترتیب در رقم فرامان تحت تیمار عدم محلول‌پاشی سالیسیلیک‌اسید (۲/۸۹ درصد) و در رقم فرامان در شرایط کاربرد (۱/۰۳ درصد) به‌دست آمد. در شرایط کشت دیرهنگام نیز بیش‌ترین و کم‌ترین درصد اسیداستئاریک به‌ترتیب در رقم پرنیان تحت تیمار عدم محلول-پاشی سالیسیلیک‌اسید (۲/۶۹ درصد) و در رقم پرنیان در شرایط کاربرد سالیسیلیک‌اسید (۱/۰۳ درصد) حاصل شد (شکل ۳-ج). سایر اسیدهای چرب نیز با تأخیر در زمان کاشت کاهش یافت، اگرچه کاربرد سالیسیلیک‌اسید سبب افزایش معنی‌دار مقادیر آن در هر دو تاریخ کاشت شد (شکل ۳-چ).



شکل ۳. مقایسه میانگین برهم کنش تاریخ کاشت، رقم و محلول پاشی سالیسیلیک/اسید بر محتوای اولئیک اسید (الف)، لینولئیک اسید (ب)، لینولئیک اسید (پ)، پالمیتیک اسید (ت)، استتاریک اسید (ج) و سایر اسیدهای چرب (چ) ارقام گلرنگ

۵. بحث

یکی از مهم ترین نشانه های تنش گرمایی، کاهش فعالیت فتوسنتزی گیاه است (جاندا^۱ و همکاران، ۲۰۱۲). تنش دمای بالا با اختلال در سنتز کلروفیل، آسیب به فتوسیستم II و ایجاد تنش اکسیداتیو از طریق تجمع گونه های اکسیژن واکنش

گر، فتوستنز را مختل می‌کند (وحید^۱ و همکاران، ۲۰۰۷). نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد سالیسیلیک‌اسید موجب بهبود سرعت فتوستنز تحت تنش شدید گرما شد. این اثر را می‌توان به نقش حفاظتی سالیسیلیک‌اسید در تثبیت غشاهای کلروپلاست، افزایش محتوای کلروفیل و القای آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان نسبت داد، به گونه‌ای که با کاهش آسیب اکسیداتیو، پایداری سیستم فتوستنزی را حفظ می‌کنند (حیات و همکاران، ۲۰۱۰؛ خان و همکاران، ۲۰۱۳). همچنین، به‌نظر می‌رسد سالیسیلیک‌اسید با بهبود انتقال کربوهیدرات‌ها به اندام‌های زایشی به‌عنوان مخازن فیزیولوژیک، موجب افزایش فتوستنز خالص شده است. با این حال، این به‌نظر می‌رسد سازوکارهای محافظتی در ارقام مورد مطالعه به‌منظور حفاظت و دفاع در برابر اثرات نامطلوب ناشی از تنش گرمای انتهایی فصل رشد متفاوت باشد. تفاوت واکنش ارقام به تنش گرمایی نشان‌دهنده نقش ژنتیکی و برهم‌کنش میان تنش و محلول‌پاشی است (کبیری^۲ و همکاران، ۲۰۱۴). همانطور که ملاحظه می‌گردد در رقم حساس پرنیان، تفاوت معنی‌داری میان تیمار شاهد و محلول‌پاشی مشاهده شد، درحالی که در رقم متحمل فرامان این اختلاف کم‌تر بود (شکل ۱-ب). به‌نظر می‌رسد حفظ پایداری فتوستنز در رقم فرامان ناشی از توانایی ژنتیکی بالاتر در فعال‌سازی سازوکارهای تحمل به تنش و تنظیم باز نگه‌داشتن روزنه‌ها باشد. همچنان که سایر یافته‌ها نیز نشان داده‌اند که سالیسیلیک‌اسید با افزایش ظرفیت فتوستنزی، خسارت ناشی از دمای بالا را کاهش می‌دهد (شاک^۳ و همکاران، ۲۰۱۸؛ دیناروندی و همکاران، ۱۴۰۴).

هدایت روزنه‌ای از عوامل اصلی تعیین‌کننده عملکرد فتوستنزی و وضعیت آب گیاه است و کاهش آن با حساسیت به تنش اسمزی مرتبط است (راهنما و همکاران، ۲۰۱۰). در این پژوهش، هرچند واکنش هر دو رقم فرامان و پرنیان به افزایش دما و کاربرد سالیسیلیک‌اسید تا حدودی مشابه بود، اما شدت تغییرات آن‌ها متفاوت بود. هدایت روزنه‌ای در کشت دیرنگام کاهش یافت و با محلول‌پاشی سالیسیلیک‌اسید بهبود یافت. کاهش هدایت روزنه‌ای در شرایط گرما به‌طور عمده ناشی از بسته‌شدن روزنه‌ها برای کاهش تعرق و جلوگیری از اتلاف آب است (هائو^۴ و همکاران، ۲۰۱۹). در مقابل، کاربرد سالیسیلیک‌اسید از بسته‌شدن بیش از حد روزنه‌ها جلوگیری کرده و با تنظیم تورژانس سلول‌های محافظ و تعامل با هورمون‌هایی مانند آبسزیک‌اسید، تعادل بین حفظ آب و جذب دی‌اکسیدکربن را برقرار می‌سازد (میورا^۵ و تادا^۶، ۲۰۱۴؛ عسکری^۷ و احسان‌زاده، ۲۰۱۵؛ دیناروندی و همکاران، ۱۴۰۴).

پایین‌تربودن غلظت دی‌اکسیدکربن زیر روزنه در رقم متحمل فرامان ناشی از افزایش میزان آسیمیلایسیون و کارایی بالاتر دستگاه فتوستنزی در تثبیت دی‌اکسیدکربن جذب‌شده نسبت به رقم حساس پرنیان بود. در شرایط تنش گرمایی، کاربرد ۴۰۰ میلی‌مولار سالیسیلیک‌اسید به‌ویژه در رقم فرامان، باعث بهبود سرعت جذب دی‌اکسیدکربن شد، درحالی که رقم حساس پرنیان تجمع دی‌اکسیدکربن در اتاقک زیر روزنه را تجربه کرد که نشان‌دهنده کاهش عملکرد فتوستنزی ناشی از اثرات نامطلوب دما بود. به‌طور کلی، با افزایش دمای محیط، غلظت دی‌اکسیدکربن اتاقک زیر روزنه‌ای در رقم حساس پرنیان بیش‌تر از فرامان بود که این امر بیانگر اثر منفی دمای بالا بر دستگاه فتوستنزی آن است. در رقم مقاوم فرامان، محلول‌پاشی سالیسیلیک‌اسید با افزایش سرعت فتوستنز موجب بهبود کارایی استفاده از دی‌اکسیدکربن زیر روزنه و کاهش غلظت آن شد. نتایج پژوهش حاضر با یافته‌های پیشین مبنی بر این که کاهش غلظت دی‌اکسیدکربن زیر روزنه

1. Wahid
2. Kabiri
3. Shaki
4. Hao
5. Miura
6. Tada
7. Askari

محدودیت فتوسنتز را افزایش می‌دهد و سالیسیلیک/اسید با بهبود سرعت فتوسنتز کارایی گیاه را در استفاده از دی اکسید کربن زیر روزه افزایش می‌دهد، همخوانی دارد (وق^۱ و همکاران، ۲۰۱۸).

در این مطالعه، کاربرد سالیسیلیک/اسید به‌طور قابل توجهی میزان ترقق را افزایش داد. در شرایط دمای بالا، گیاهان با بسته نگه داشتن روزه‌ها برای حفظ آب، ترقق را کاهش می‌دهند، اما این واکنش دفاعی می‌تواند تبادل گاز را محدود کرده و فتوسنتز و رشد را کاهش دهد (وحید و همکاران، ۲۰۰۷). افزایش ترقق پس از تیمار با سالیسیلیک/اسید نشان‌دهنده نقش این تنظیم‌کننده رشد در حفظ عملکرد روزه‌ها و انتقال آب تحت تنش گرمایی است.

تنش گرما به‌طور معمول منجر به کاهش هدایت روزه‌ای و ترقق می‌شود که نتیجه بسته شدن روزه‌ها به واسطه هورمون‌های تنش مانند آبسازیک/اسید است (چاوز^۲ و همکاران، ۲۰۲۳). سالیسیلیک/اسید می‌تواند این سازوکارها را تعدیل نماید و باز شدن جزئی روزه‌ها را حتی در شرایط تنش ممکن سازد، که این امر منجر به ترقق پایدار و خنک شدن برگ‌ها و محافظت از دستگاه فتوسنتزی می‌شود (میورا و تادا، ۲۰۱۴). علاوه بر این، سالیسیلیک/اسید با بهبود پایداری غشا، تجمع اسمولیت‌ها (مانند پرولین، گلیسین بتائین) و تنظیم فعالیت آکواپورین‌ها، پتانسیل آب برگ را افزایش داده و ترقق را در شرایط گرمایی تسهیل می‌کند (حیات و همکاران، ۲۰۱۰). بنابراین، افزایش ترقق در بوته‌های تیمار شده با سالیسیلیک/اسید نشان‌دهنده بهبود ظرفیت جذب و انتقال آب و عملکرد کارآمدتر روزه‌هاست. به‌طور کلی، کاربرد سالیسیلیک/اسید با حفظ سلامت سیستم ریشه‌ای در برابر اثرات نامطلوب تنش گرمای انتهایی فصل، رشد گیاه را افزایش داده و باعث جذب بیش‌تر آب می‌گردد. جذب بیش‌تر آب و ممانعت از بسته شدن روزه‌ها موجب افزایش ترقق و کاهش دمای برگ می‌گردد. اثرات مشابه سالیسیلیک/اسید بر ترقق و هدایت روزه‌ای در سایر محصولات تحت تنش غیرزیستی گزارش شده است. برای مثال، در گندم و ذرت، کاربرد سالیسیلیک/اسید هدایت روزه‌ای و ترقق را افزایش داد و به بهبود تحمل حرارتی و کارایی فتوسنتز کمک کرد (فاروق و همکاران، ۲۰۰۹؛ خان و همکاران، ۲۰۱۳). در کلزا، سالیسیلیک/اسید سرعت فتوسنتز و هدایت روزه‌ای را در شرایط تنش گرما بهبود بخشید، که با افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی و سلامت غشا همراه بود (دیناروندی و همکاران، ۱۴۰۴).

مطالعات نشان داده‌اند که یکی از عوامل مهم محدودکننده سرعت فتوسنتز در شرایط تنش گرما میزان هدایت مزوفیلی یا کارایی کربوکسیلاسیون است (احمدی^۳ و بیکر، ۲۰۰۱). گذشتن سرعت فتوسنتز و تجمع دی‌اکسید کربن در اندام‌های فتوسنتزکننده در گیاه به مفهوم عدم توانایی سلول‌های مزوفیل در استفاده از دی‌اکسید کربن و کارایی پایین کربوکسیلاسیون گیاه می‌باشد. تجمع دی‌اکسید کربن در برگ در شرایط دمای بالا موجب عدم توانایی گیاه در استفاده از دی‌اکسید کربن باوجود عبور از سلول‌های روزه‌ای می‌باشد. در واقع تنش‌های محیطی از طریق افزایش محدودیت‌های روزه‌ای، موجب تغییرات محتوای نسبی آب برگ، دی‌اکسید کربن زیرروزه‌ای، سرعت ترقق، سرعت فتوسنتز و هدایت مزوفیلی می‌گردد. رابطه مثبت و معنی‌دار هدایت مزوفیلی با سرعت فتوسنتز، شدت ترقق و هدایت روزه‌ای نیز توسط دیگر پژوهش‌گران تأیید شده است (مک‌آنیش و تیلور^۴، ۲۰۱۷). اگرچه نتایج بعضی از پژوهش‌گران نیز تأکید بر عدم تأثیر محلول پاشی سالیسیلیک/اسید بر فتوسنتز و هدایت مزوفیلی دارد (باندورسکا و استروینسکای^۵، ۲۰۰۵). در مطالعه حاضر کاربرد سالیسیلیک/اسید تا حدودی موانع استفاده از دی‌اکسید کربن موجود در سلول‌های مزوفیل برگ گیاه گلرنگ را کاهش داد.

1. Végh
2. Chaves
3. Ahmadi
4. McAinsh
5. Bandurska

کارایی مصرف آب فتوستتزی، میزان فتوستتز به‌ازای هر واحد تعرق را نشان می‌دهد. به‌نظر می‌رسد دلیل بالاتر بودن میزان کارایی مصرف آب فتوستتزی در رقم فرامان در شرایط تنش گرما تحت کاربرد سالیسیلیک‌اسید نسبت به شرایط عدم کاربرد آن، بالاتر بودن سرعت فتوستتزی یا آسیمیلسیون کربن در این تیمار است. دلیل پایین بودن کارایی مصرف آب فتوستتزی در شرایط کاشت به‌هنگام و در شرایط کاربرد سالیسیلیک‌اسید نسبت به تیمار عدم کاربرد آن نیز بالاتر بودن راندمان روزنه‌ها و افزایش میزان تعرق همراه با سرعت فتوستتز لحظه‌ای بوده که منجر به کاهش کارایی فتوستتز لحظه‌ای گیاه در شرایط مساعد محیطی گردیده است. پژوهش‌گران گزارش کردند که کاهش کارایی مصرف آب با افزایش میزان تنش می‌تواند ناشی از کاهش میزان دی‌اکسید کربن زیرروزنه‌ای باشد که بیش‌تر متأثر از عوامل غیرروزنه‌ای است تا عوامل روزنه‌ای (فلکساس^۱ و همکاران، ۲۰۰۶). در این آزمایش در اثر افزایش دمای محیط، فتوستتز با سرعت بیش‌تری نسبت به شدت تعرق کاهش یافت و در نتیجه منجر به کاهش میزان کارایی مصرف آب فتوستتزی گردید. از آنجاکه، کاربرد سالیسیلیک‌اسید باعث افزایش بیش‌تر سرعت فتوستتز در گیاهان تحت شرایط تنش شد تا حدودی باعث بهبود وضعیت کارایی مصرف آب فتوستتزی گردید. از طرفی وجود دمای بالا، بیش‌ترین کاهش معنی‌دار کارایی مصرف آب فتوستتزی را در رقم پرریان ایجاد کرد. بنابراین، کاشت این رقم در مناطقی که احتمال وقوع افزایش دمای بالای پس از مرحله گلدهی وجود دارد، با ریسک بالاتری همراه بوده و توصیه می‌شود که با ارقام مناسب‌تری همچون فرامان جایگزین شود.

تنش گرما به‌علت تخریب کلروپلاست‌ها و اثرات نامطلوب بر کلروفیل باعث کاهش میزان سبزی‌نگی برگ شد. به‌نظر می‌رسد با محلول‌پاشی سالیسیلیک‌اسید میزان سبزی‌نگی برگ به‌دلیل افزایش غلظت پروتوپلاسم سلول و در نتیجه به‌واسطه افزایش غلظت سلول‌های مزوفیل و هم‌چنین کاهش اندازه و حجم سلول‌ها و در نتیجه کاهش سطح برگ، افزایش یافته است (موهارکار^۲ و همکاران، ۲۰۰۳).

در این پژوهش به‌نظر می‌رسد گرمای پایان فصل رشد، سبب برخورد مراحل تلقیح و دانه‌بندی گیاه با دمای بالاتر از حد تحمل گیاه شده است. به همین دلیل در تیمار تنش گرمایی ناشی از کشت دیر هنگام میزان عملکرد دانه نسبت به سایر تیمارهای مشابه کاهش بیش‌تری نشان داد. عملکرد بهتر هر دو رقم گلرنگ در تاریخ کاشت به‌هنگام را می‌توان به میزان بیش‌تر آب در دسترس در کل دوره رشد محصول (۹۷ میلی‌متر) (جدول ۲) و زمان گلدهی زودتر و هم‌چنین دوره پرشدن دانه طولانی‌تر در مقایسه با تاریخ کاشت دیر هنگام نسبت داد که باعث کاهش احتمال مواجهه با تنش محیطی در طول مراحل گلدهی و پرشدن دانه شد. در واقع، تاریخ کاشت دیر هنگام، قرارگرفتن محصول در معرض میانگین دمای روزانه بالاتر را در هر دو مرحله رویشی و زایشی (۳/۹ درجه سانتی‌گراد) افزایش داد. تنش گرما از طریق فرایندهای فیزیولوژیک و متابولیک عملکرد گلرنگ تأثیر می‌گذارد (صالحی و همکاران، ۲۰۲۳). نتایج این پژوهش مشابه نتایج گزارش‌شده در سایر مطالعات تأیید می‌کند که دمای بالا به‌طور قابل‌توجهی بر رشد دانه و مدت زمان پرشدن دانه تأثیر گذاشته و در نهایت باعث کاهش عملکرد شده است (شیخ‌ممو و همکاران، ۱۴۰۲؛ گائو^۳ و همکاران، ۲۰۱۷). در مطالعات پیشین نیز دماهای بالای در زمان پرشدن و رسیدن دانه گلرنگ، منجر به کاهش عملکرد کل دانه شد (راهنما و همکاران، ۲۰۲۴). در این پژوهش اثر منفی تنش دمای بالای انتهای فصل رشد بر عملکرد دانه ارقام موردبررسی گلرنگ با محلول‌پاشی سالیسیلیک‌اسید تا حدودی تعدیل شد. در سایر پژوهش‌ها نیز نقش تعدیل‌کننده سالیسیلیک‌اسید مورد تأیید قرار گرفته است (بریتو^۴ و همکاران، ۲۰۱۹؛ دیناروندی و همکاران، ۱۴۰۴).

1. Flexas
2. Moharekar
3. Guo
4. Brito

فلاگلا^۱ و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کردند که در شرایط تنش، میزان اسیداولئیک به میزان ۲/۶ درصد نسبت به شرایط بهینه رشد افزایش یافت. از سوی دیگر، آنگر^۲ (۲۰۱۲) همبستگی مثبتی میان درصد اسیداولئیک و شرایط محیطی در طول دوره زایشی گزارش کرد. فلاگلا و همکاران (۲۰۱۲) تفاوت در شرایط محیطی را عامل نتایج متناقض حاصل از پژوهش‌های مختلف دانستند. در آزمایش حاضر به نظر می‌رسد با افزایش شدت تنش گرما رشد گیاه کاهش یافته است. این کاهش رشد بر میزان مواد انتقال یافته به دانه‌ها تأثیر گذاشته و در نهایت موجب تغییر در ترکیب اسیدهای چرب از جمله اسیداولئیک و کاهش آن شده است. نتایج این پژوهش هم‌چنین نشان داد که کاربرد سالیسیلیک/اسید در هر دو تاریخ کاشت، تأثیر معنی‌داری بر افزایش درصد این اسید چرب نداشت.

گلرنگ از محتوای بالای لینولئیک/اسید و نسبت زیاد چربی‌های غیراشباع به اشباع برخوردار است (نای^۳ و راه^۴، ۲۰۱۵). هم‌چنین، نتایج مشابهی توسط فلاگلا و همکاران (۲۰۱۲) گزارش شده است، به گونه‌ای که کاهش ۲/۸ درصدی لینولئیک/اسید در شرایط تنش نسبت به محیط بدون تنش مشاهده گردید. ارسلان^۵ (۲۰۰۷) ارتباط مثبت معنی‌داری بین اسیداولئیک و اسیدپالمیتیک گزارش کرد. هم‌چنین، مطابق نظر فاروقی^۶ و همکاران (۲۰۱۵)، تنظیم‌کننده‌های رشد در شرایط تنش می‌توانند موجب افزایش کیفیت روغن گردند. زارع^۷ (۲۰۰۴) بیان کرد که با افزایش شدت تنش، درصد اسیدهای چرب غیراشباع کاهش می‌یابد و بیش‌ترین اثر تنش خشکی در سویا مربوط به اسیدهای پالمیتیک و اولئیک است. پیش از این نیز گزارش شده است که افزایش غلظت اسیداستتاریک در شرایط دمایی بالا با کاهش لینولئیک/اسید در دانه‌های روغنی همراه است (باللویی^۸ و همکاران، ۲۰۰۹؛ راهنما و همکاران، ۲۰۲۴ ب).

محلول پاشی سالیسیلیک/اسید در شرایط دمایی مطلوب سبب کاهش درصد اسیداستتاریک شد. در این شرایط، رقم پرنیان (محلول پاشی و عدم محلول پاشی سالیسیلیک/اسید) درصد کم‌تری از اسیداستتاریک را نشان داد. با این حال، در شرایط تنش گرمایی، این الگو متفاوت بود و به نظر می‌رسد تفاوت واکنش دو رقم پرنیان (حساس) و فرامان (متحمل) ناشی از سازوکارهای ژنتیکی متفاوت در واکنش به تنش گرما باشد. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش تأیید کرد که ترکیب اسیدهای چرب به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر عوامل ژنوتیپی و محیطی قرار دارد (راچه^۹ و همکاران، ۲۰۱۹؛ راهنما و همکاران، ۲۰۲۴ ب).

۶. نتیجه‌گیری

به‌طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد که وقوع تنش گرمای آخر فصل ناشی از کاشت دیر هنگام سبب کاهش ویژگی‌های فتوسنتزی ارقام مورد مطالعه گلرنگ شد و مقادیر این کاهش در رقم حساس پرنیان به‌طور معنی‌داری بالاتر از رقم فرامان بود. تحت این شرایط کاربرد خارجی سالیسیلیک/اسید در غلظت ۴۰۰ میلی‌مولار به‌صورت محلول پاشی سبب بهبود ویژگی‌های فتوسنتزی و به‌دنبال آن عملکرد دانه به‌ویژه در رقم متحمل فرامان شد. کاربرد سالیسیلیک/اسید تا حد زیادی توانست اثرات منفی تنش گرمایی را بر این صفات تعدیل نماید، به گونه‌ای که بیش‌ترین هدایت روزنه‌ای و کارایی

1. Flagella
2. Unger
3. Ny
4. Rah
5. Arslan
6. Farooqi
7. Zare
8. Bellaloui
9. Roche

کربوکسیلاسیون (به‌ترتیب ۷۱۱ و ۱/۰۷۹ میلی‌مول بر مترمربع بر ثانیه) و عملکرد دانه (۳۱۲۰ کیلوگرم در هکتار) در کاشت به‌هنگام و کاربرد ۴۰۰ میکرومولار سالیسیلیک‌اسید در رقم فرامان مشاهده شد. همچنین تنش گرما به‌طور متفاوتی سبب تغییر در ترکیب اسیدهای چرب روغن دانه ارقام مورد مطالعه شد. به‌طوری‌که کاشت دیر هنگام باعث کاهش درصد اسیدهای چرب اولئیک و لینولئیک و افزایش درصد اسیدهای لینولئیک و پالمیتیک گردید. تغییرات درصد اسیداستئاریک تحت تنش گرمایی در دو رقم مورد مطالعه متفاوت بود، به‌طوری‌که در رقم فرامان کاهش و در رقم پرریان افزایش نشان داد. با توجه به نتایج، کاربرد غلظت ۴۰۰ میلی‌مولار سالیسیلیک‌اسید توانست از طریق بهبود فعالیت فتوسنتزی و ترکیب اسیدهای چرب روغن دانه در کاهش اثرات مخرب تنش گرمای پایان فصل رشد در گلرنگ مؤثر باشد و با توجه به تأثیر این هورمون بر بهبود ترکیب اسیدهای چرب روغن دانه در شرایط تنش گرما می‌توان با کاربرد برگی این هورمون به‌عنوان یک راه‌کار مدیریتی در شرایط تنش استفاده کرد.

۷. تشکر و قدردانی

از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز به‌خاطر تأمین بخشی از هزینه‌های این پژوهش به شماره پژوهانه SCU.AA1402.96، تشکر و قدردانی می‌گردد.

۸. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۹. منابع

- دیناروندی، مارال؛ راهنما، افراسیاب؛ مسکرباشی، موسی و ذوفن، پرژک (۱۴۰۴). اثر محلول پاشی سالیسیلیک‌اسید بر ویژگی‌های فتوسنتزی، فعالیت آن‌تی‌اکسیدان‌های آنزیمی و عملکرد ارقام کلزا (*Brassica napus* L.) در شرایط تنش گرمای آخر فصل. *مجله تولید گیاهان زراعی*، ۱۸ (۲)، ۸۷-۱۱۲.
- شیخ‌ممو، بهنوش؛ راهنما، افراسیاب و حسینی، پیمان (۱۴۰۲). ارزیابی صفات بیوشیمیایی و عملکرد دانه ارقام آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.) در واکنش به تنش گرمای انتهای فصل در منطقه اهواز. *نشریه علوم زراعی/ایران*، ۲۵ (۳)، ۲۷۵-۲۹۳.
- صالحی، فرشاد؛ راهنما، افراسیاب؛ مسکرباشی، موسی و مهدی‌خانلو، خسرو (۱۳۹۸). اثر تنش گرمای آخر فصل بر برخی صفات زراعی، فیزیولوژیک و عملکرد روغن ارقام گلرنگ در شرایط آب‌وهوایی اهواز. *پژوهش‌های زراعی/ایران*، ۱۷ (۳)، ۴۹۱-۵۰۲.

References

- Ahmadi, A., & Baker, D.A. (2001). The effect of water stress on the activities of key regulatory enzymes of the sucrose to starch pathway in wheat. *Plant Growth Regulation*, 35(1), 81-91.
- AOCS. (1993). Official methods and recommended practices of the American Oil Chemists, Society, AOCS Press, Champaign, U.S.A.
- Arslan, B. (2007). The determination of oil content and fatty acid compositions of domestic and exotic safflower (*Carthamus tinctorius* L.) genotypes and their interactions. *Journal of Agronomy*, 6(16), 415-420.
- Askari, E., & Ehsanzadeh, P. (2015). Drought stress mitigation by foliar application of salicylic acid and their interactive effects on physiological characteristics of fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.) genotypes. *Acta Physiologiae Plantarum*, 37, 1-14.
- Bandurska, H., & Stroinski, A. (2005). The effect of salicylic acid on barley response to water deficit. *Acta Physiologiae Plantarum*, 27(3), 379-386.
- Bellaloui, N., Smith, J.R., Ray, J.D., & Gillen, A.M. (2009). Effect of maturity on seed composition in the early soybean production system as measured on near-isogenic soybean lines. *Crop Sciences*, 49(2), 608-620.

- Brito, C., Dinis, L.T., Ferreira, H., Coutinho, J., Moutinho-Pereira, J., & Correia, C.M. (2019). Salicylic acid increases drought adaptability of young olive trees by changes on redox status and ionome. *Plant Physiology and Biochemistry*, 141, 315-324.
- Chang-Fung-Martel, J., Harrison, M.T., Brown, J.N., Rawnsley, R., Smith, A.P., & Meinke, H. (2021). Negative relationship between dry matter intake and the temperature-humidity index with increasing heat stress in cattle: a global meta-analysis. *International Journal of Biometeorology*, 1-11.
- Chaves, M.M., Maroco, J.P., & Pereira, J.S. (2003). Understanding plant responses to drought-from genes to the whole plant. *Functional Plant Biology*, 30(3), 239-264.
- Crafts-Brandner, S.J., & Salvucci, M.E. (2002). Sensitivity of photosynthesis in a C4 plant, maize, to heat stress. *Plant Physiology*, 129(4), 1773-1780.
- Dinarvandi, M., Rahnama, A., Meskarbashee, M., & Zoufan, P. (2025). Foliar application of salicylic acid effect on photosynthetic properties, enzymatic antioxidant activities, and yield of canola (*Brassica napus* L.) cultivars under terminal heat stress. *Journal of Crop Production*, 18(2), 87-112. (In Persian).
- Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., & Basra, S. M. A. (2009). Plant drought stress: Effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(1), 185-212.
- Farooqi, A.H.A., Fatima, S., & Khanand, S.S.A. (2015). Ameliorative effect of chlormequat chloride and IAA on drought stress of plants of *Cymbopogon martinii* and *C. winterianus*. *Plant Growth Regulations*, 46(3), 277-284.
- Fischer, R. A., Rees, D., Sayre, K. D., Lu, Z. M., Condon, A. G., & Saavedra, A. L. (1998). Wheat yield progress associated with higher stomatal conductance and photosynthetic rate, and cooler canopies. *Crop Science*, 38(6), 1467-1475.
- Flagella, Z., Rotunno, T., Tarantino, E., Di- Caterina, R., & De-Caro, A. (2012). Changes in seed yield and oil fatty acid composition of high oleic sunflower (*Helianthus annuus* L.) hybrids in relation to the sowing date and the water regime. *European Journal of Agronomy*, 17(11), 221-230.
- Flexas, J., Ribas-Carbo, M., Bota, J., Galmés, J., Henkle, M., Martinez-Canellas, S., & Medrano, H. (2006). Decreased Rubisco activity during water stress is not induced by decreased relative water content but related to conditions of low stomatal conductance and chloroplast CO₂ concentration. *New Phytologist*, 172, 73-82.
- Guo, Y., Si, P., Wang, N., Wen, J., Yi, B., Ma, C., & Shen, J. (2017). Genetic effects and genotype× environment interactions govern seed oil content in *Brassica napus* L. *BMC genetics*, 18, 1-11.
- Hao, L., Guo, L., Li, R., Cheng, Y., & Zheng, Y. (2019). Responses of photosynthesis to high temperature stress associated with changes in leaf structure and biochemistry of blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.). *Scientia Horticulturae*, 246(3), 251-264.
- Harrison M.T. (2021). Climate change benefits negated by extreme heat. *Nature Food*, 2(11), 855-856.
- Hayat, Q., Hayat, S., Irfan, M., & Ahmad, A. (2010). Effect of exogenous salicylic acid under changing environment: a review. *Environmental and Experimental Botany*, 68(1), 14-25.
- He, M., Ding, N.Z. (2020). Plant Unsaturated Fatty Acids: Multiple Roles in Stress Response. *Frontiers in Plant Science*, 4(11), 562785.
- Horváth, E., Szalai, G., & Janda, T. (2007). Induction of abiotic stress tolerance by salicylic acid signaling. *Journal of Plant Growth Regulation*, 26(3), 290-300.
- Jamshidi Jam, B., Shekari, F., Andalibi, B., Fotovat, R., & Jafarian, V. (2023). The Effects of salicylic acid and silicon on safflower seed yield, oil content, and fatty acids composition under salinity stress. *Silicon*, 15, 4081-4094.
- Janda, K., Hideg, E., Kov, L., & Janda, T. (2012). Salicylic acid may indirectly influence the photosynthetic electron transport. *Journal of Plant Physiology*, 169(10), 971-978.
- Kabiri, R., Nasibi, F., & Farahbakhsh, H. (2014). Effect of exogenous salicylic acid on some physiological parameters and alleviation of drought stress in *Nigella sativa* plant under hydroponic culture. *Plant Protection Science*, 50(1), 43-51.
- Kachroo, P., Venugopal, S.C., Navarre, D.A., Lapchyk, L., & Kachroo, A. (2005). Role of salicylic acid and fatty acid desaturation pathways in ssi2-mediated signaling. *Plant Physiology*, 139(4), 1717-35.
- Khan, M.I.R., Iqbal, N., Masood, A., Per, T.S., & Khan, N. A. (2013). Salicylic acid alleviates adverse effects of heat stress on photosynthesis through changes in proline production and ethylene formation. *Plant Signaling & Behavior*, 8, e26374

- Ma, D.K.K., Li, Z.J., Lu, A.Y., Sun, F., Chen, S.D., Rothe, M., Menze, R., Sun, F., & Horvitz, H.R. (2015). Acyl-CoA dehydrogenase drives heat adaptation by sequestering fatty acids. *Cell*, 161, 1152-1163.
- McAinsh, M.R., & Taylor, J.E. (2017). Stomata. *Encyclopedia of Applied Plant Sciences*, 1(4), 128-134.
- Medrano, H., Tomás, M., Martorell, S., Flexas, J., Hernández, E., Rosselló, J., & Bota, J. (2015). From leaf to whole-plant water use efficiency (WUE) in complex canopies: limitations of leaf WUE as a selection target. *The Crop Journal*, 3(3), 220-228.
- Miura, K., & Tada, Y. (2014). Regulation of water, salinity, and cold stress responses by salicylic acid. *Frontiers in Plant Science*, 5, 4.
- Moharekar, S.T., Lokhande, S.D., Hara, T., Tanaka, R., Tanaka, A., & Chavan, P.D. (2003). Effects of salicylic acid on chlorophyll and carotenoid contents on wheat and moong seedlings. *Photosynthetica*, 41(3), 315-317.
- Ny, A.S., & Rah, E.D. (2015). Characteristics and oxidative stability of some safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Journal of Nutrition & Food Sciences*, 14(3), 1-6.
- Praserthai, P., Paethaisong, W., Theerakulpisut, P., & Dongsansuk, A. (2022). High temperature alters leaf lipid membrane composition associated with photochemistry of PSII and membrane thermostability in rice seedlings. *Plants*, 30 (11),1454.
- Rahnama, A., James, R.A., Poustini, K., & Munns, R. (2010). Stomatal conductance as a screen for osmotic stress tolerance in durum wheat growing in saline soil. *Functional Plant Biology*, 37, 255-263.
- Rahnama, A., Hosseinalipour, B., Farrokhian Firouzi, A., Harrison, M.T., & Ghorbanpour, M. (2024a). Root architecture traits and genotypic responses of wheat at seedling stage to water-deficit stress. *Cereal Research Communications*, 52, 1499-1510.
- Rahnama, A., Salehi, F., Meskarbashee, M., Mehdi Khanlou, K., Ghorbanpour, M., & Harrison, M.T. (2024b). High temperature perturbs physicochemical parameters and fatty acids composition of safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *BMC Plant Biology*, 24, 1080.
- Roche, J., Mouloungui, Z., Cerny, M., & Merah, O. (2019). Effect of Sowing Dates on Fatty Acids and Phytosterols Patterns of *Carthamus tinctorius* L. *Applied Sciences*, 9(14), 2839.
- Salehi, F., Rahnama Ghahfarokhi, A., Meskarbashee, M., & Mehdikhanlou, K. (2019). Effect of terminal heat stress on some agronomic, physiological and oil yield traits of safflower cultivars (*Carthamus tinctorius* L.) under ahvaz conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 17(3), 491-502. (In Persian).
- Salehi, F., Rahnama, A., Meskarbashee, M., Mehdi Khanlou, K., & Ghorbanpour, M. (2023). Physiological and metabolic changes of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) cultivars in response to terminal heat stress. *Journal of Plant Growth Regulation*, 42(10), 6585-6600.
- Shaki, F., Maboud, H.E., & Niknam, V. (2018). Growth enhancement and salt tolerance of Safflower (*Carthamus tinctorius* L.), by salicylic acid. *Current Plant Biology*, 13(4), 16-22.
- Sheikh Mamo, B., Rahnama, A., & Hassibi, P. (2023). Evaluation of biochemical traits and seed yield of sunflower (*Helianthus annuus* L.) cultivars in response to terminal heat stress in Ahvaz, Iran. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 25 (3), 275-293. (In Persian).
- Unger, P.W. (2002). Time and frequency of irrigation effects on sunflower production and water use. *Soil Science Society of America Journal*, 46(5), 1072-1076.
- Végh, B., Marček, T., Karsai, I., Janda, T., & Darkó, É. (2018). Heat acclimation of photosynthesis in wheat genotypes of different origin. *South African Journal of Botany*, 117, 184-192.
- Wahid, A., Gelani, S., Ashraf, M., & Foolad, M.R. (2007). Heat tolerance in plants: an overview. *Environmental and Experimental Botany*, 61(3), 199-223.
- Zare, M. (2004). Evaluation of tolerance of some soybean genotypes to drought stress. *Iranian Journal of Agriculture Science*, 35(4), 261-272.