Vol 26, No. 1, Spring 2024

University of Tehran Press

Journal of Crops Improvement

Online ISSN: 2345-6957

Homepage: https://jci.ut.ac.ir/

Effect of Water Stress on Physiological and Biochemical Traits of Safflower Genotypes

Masomeh Ganji[1]✉ | Serolah Galeshi[2] | Hamid Jabbari[3] | Forough Sanjarian[4] | Benjamin Torabi[5]

1. Corresponding Author, Department of Agronomy, University Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgon, Iran. E-mail: masoumeh.ganji_s96@gau.ac.ir
2. Department of Agronomy, University Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgon, Iran. E-mail: galeshi@gau.ac.ir
3. Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. E-mail: h.jabbari@areeo.ac.ir
4. Plant Bio-Product group, Agricultural Biotechnology Institute, National Institute of Genetic Engineering and Biotechnology (NIGEB), Tehran. Iran. E-mail: fsanjarian@nigeb.ac.ir
5. Department of Agronomy, University Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgon, Iran. E-mail: b.torabi@gau.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 07 November 2022
Received in revised form
27 July 2023
Accepted 03 September 2023
Published online 13 March 2024

Keywords:
Antioxidant enzymes
Canopy temperature
Fatty acid
Linoleic acid
Relative water content

ABSTRACT

Objective: Water stress is a critical environmental factor, affecting the crucial processes and yield of crops. This study aimed to investigate the effect of water stress on the physiological and biochemical traits of safflower genotypes.

Methods: The study was carried out as a factorial experiment based on a randomized complete block design at the Seed and Plant Improvement Research Institute during 2017-19. The treatments included two irrigation levels (40% and 80% depletion of the available water) and Parnian, Goldasht, and Kazak genotypes. The plants were sown in soil columns with a height of 150 and a diameter of 23 cm, and irrigated by a drip system. Antioxidant enzymes activity, malondialdehyde accumulation, proline, relative water content, chlorophyll, seed yield, and fatty acids composition were measured at the end of the experiment.

Results: Water stress significantly increased the accumulation of hydrogen peroxide and malondialdehyde in safflower genotypes which led to increased catalase and peroxidase enzyme activity by 1 and 2.5 U, respectively. The proline content increased about 16 times under water stress conditions. In contrast, the relative water content showed a significant decrease, which resulted in increased canopy temperature and decreased seed yield by 70%. The Kazak genotype had the lowest increase in canopy temperature under stress conditions and showed higher yield stability. Moreover, the fatty acid composition of seed oil changed and the amount of linoleic acid decreased by 1.8% under water stress conditions.

Conclusion: The results indicated that in addition to drought-related physiological traits, the lack of increase in saturated/unsaturated fatty acid ratio is also an important indicator in screening superior genotypes for cultivation under water shortage conditions.

Cite this article: Ganji, M., Galeshi, S., Jabbari, H., Sanjarian, F., & Torabi, B. (2024). Effect of Water Stress on Physiological and Biochemical Traits of Safflower Genotypes. *Journal of Crops Improvement*, 26 (1), 75-89.
DOI: https://doi.org/10.22059/jci.2023.350886.2759

© The Authors.
Publisher: The University of Tehran Press.
DOI: https://doi.org/10.22059/jci.2023.350886.2759

دوره بیست و ششم، شماره اول، بهار ۱۴۰۳

انتشارات دانشگاه تهران

به زراعی کشاورزی

شاپا الکترونیکی: ۶۹۵۷-۲۳۴۵

Homepage: https://jci.ut.ac.ir/

تأثیر تنش آبی بر صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی ژنوتیپ‌های گلرنگ

معصومه گنجی[۱]✉ | سراله گالشی[۲] | حمید جباری[۳] | فروغ سنجریان[۴] | بنیامین ترابی[۵]

۱. نویسنده مسئول، گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: masoumeh.ganji_s96@gau.ac.ir

۲. گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: galeshi@gau.ac.ir

۳. مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. رایانامه: h.jabbari@areeo.ac.ir

۴. گروه زیست‌فرآورده‌های گیاهی، پژوهشکده زیست‌فناوری کشاورزی، پژوهشگاه ملی مهندسی ژنتیک و زیست‌فناوری، تهران، ایران. رایانامه: fsanjarian@nigeb.ac.ir

۵. گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: b.torabi@gau.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۱۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۵/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۲/۲۳

کلیدواژه‌ها:
آنزیم آنتی‌اکسیدانی
اسید چرب
دمای کانوپی
لینولئیک اسید
محتوای نسبی آب

چکیده

هدف: تنش آبی از مهم‌ترین عوامل محیطی مؤثر بر فرایندهای حیاتی و عملکرد گیاهان زراعی است. هدف مطالعه بررسی تأثیر تنش آبی بر صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی ژنوتیپ‌های گلرنگ بود.

روش پژوهش: آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در مزرعه تحقیقاتی مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر طی سال‌های ۹۹-۱۳۹۷ اجرا شد. تیمارها شامل دو سطح آبیاری (۴۰ و ۸۰ درصد تخلیه آب در دسترس) و سه ژنوتیپ پرنیان، گلدشت و قزاقی بود. کاشت گیاه در ستون‌های خاک به ارتفاع ۱۵۰ و قطر ۲۳ سانتی‌متر و آبیاری با سیستم قطره‌ای انجام شد. فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، تجمع مالون‌دی‌آلدهید، پرولین، محتوای نسبی آب، کلروفیل، عملکرد دانه و ترکیب اسیدهای چرب در پایان آزمایش اندازه‌گیری شد.

یافته‌ها: در اثر تنش آبی، افزایش تجمع پراکسید هیدروژن و مالون‌دی‌آلدهید میزان فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز را به‌ترتیب ۱ و ۲/۵ واحد آنزیمی افزایش داد. محتوی پرولین در شرایط تنش آبی حدود ۱۶ برابر افزایش داشت. در مقابل، محتوای نسبی آب برگ کاهش معنی‌داری نشان داد که سبب افزایش دمای کانوپی و کاهش ۷۰ درصد عملکرد دانه شد. ژنوتیپ قزاقی کم‌ترین میزان افزایش دمای کانوپی در شرایط تنش را داشت و عملکرد پایدارتری نشان داد. به‌علاوه، تحت تنش آبی ترکیب اسیدهای چرب روغن دانه تغییر یافت و مقدار لینولئیک‌اسید در شرایط تنش آبی ۱/۸ درصد کاهش داشت.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد علاوه بر صفات فیزیولوژیک مرتبط با تنش، عدم افزایش نسبت اسیدهای چرب اشباع/غیراشباع نیز شاخص مهمی در شناسایی ژنوتیپ‌های برتر جهت توسعه کشت تحت شرایط کم‌آبی می‌باشد.

استناد: گنجی، معصومه؛ گالشی، سراله؛ جباری، حمید؛ سنجریان، فروغ و ترابی، بنیامین (۱۴۰۳). تأثیر تنش آبی بر صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی ژنوتیپ‌های گلرنگ. *به‌زراعی کشاورزی*، ۲۶ (۱)، ۷۵-۸۹. DOI: https://doi.org/10.22059/jci.2023.350886.2759

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

CC BY NC

۱. مقدمه

تنش آبی یکی از مهم‌ترین عوامل محیطی است که با مکانیسم‌های مختلف چرخه حیات گیاهان زراعی را تحت تأثیر قرار دهد (لاچ[1] و همکاران، ۲۰۱۱). افزایش سازگاری گیاهان زراعی برای حفظ پایداری تولید یکی از اهداف اصلی رویکرد کشاورزی هوشمند به اقلیم[2] برای رویارویی با تغییرات اقلیمی است. توسعه گیاهان زراعی متحمل به خشکی می‌تواند یک استراتژی مؤثر برای حفظ پایداری تولید در مقابل منابع آبی رو به کاهش باشد (پولانیا[3] و همکاران، ۲۰۱۷). با توجه به وجود شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک در عمده مناطق کشور مطالعه در این زمینه برای شناسایی گیاهان متحمل به خشکی و مکانیسم‌های تحمل از اهمیت زیادی برخوردار است. از سوی دیگر، با توجه به وابستگی کشور به منابع خارجی در تأمین بخش عمده روغن خوراکی مصرفی، توسعه کشت گیاهان دانه روغنی برای کاهش وابستگی و ایجاد خوداتکایی دارای اهمیت به‌سزایی است. در چنین شرایطی، گیاه دانه روغنی گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.) با توانایی بالا در تحمل شرایط تنش آبی و شوری می‌تواند گزینه مناسبی جهت کشت در اراضی خشک و نیمه‌خشک کشور باشد. گیاه گلرنگ از یک‌سو با سازگاری به مناطقی با بارندگی زمستانه و بهاره اندک در طول دوره گل‌دهی و تشکیل دانه و از سوی دیگر با داشتن سیستم ریشه‌ای گسترده با توان جذب آب از لایه‌های زیرین خاک یک گیاه دانه روغنی مناسب برای رویارویی با چالش‌های مذکور است (حسین[4] و همکاران، ۲۰۱۶). با این‌حال، پاسخ فیزیولوژیک و عملکرد ارقام و ژنوتیپ‌های مختلف گلرنگ به شرایط تنش آبی یکسان نیست. به‌عبارتی دیگر، برخی از ژنوتیپ‌های گلرنگ به‌واسطه دارابودن صفات مورفوفیزیولوژیک برتر پایداری عملکردی بالاتری در شرایط تنش آبی دارند (کولها[5] و همکاران، ۲۰۲۱). از سوی دیگر، روغن دانه گلرنگ به‌عنوان محصول نهایی کشت این گیاه علاوه بر کمیت از نظر کیفیت نیز تحت تأثیر تنش آبی قرار دارد (رحمانی[6] و همکاران، ۲۰۱۹). با وجود این‌که ترکیب اسیدهای چرب بیش‌تر تحت کنترل عوامل ژنتیکی گیاه قرار دارد، اما تغییرات آن در شرایط تنش آبی به کاهش زمان دوره پرشدن دانه و نیز افزایش دمای کانوپی نسبت داده می‌شود. بنابراین، مطالعه پاسخ فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاه گلرنگ تحت شرایط تنش آبی در راستای شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل با عملکرد کمی و کیفی مناسب از اهمیت بالایی برخوردار است. بنابراین، هدف مطالعه حاضر بررسی صفات فیزیولوژیک مرتبط با تنش و تغییرات بیوشیمیایی سه ژنوتیپ گلرنگ در شرایط تنش آبی بود.

۲. پیشینه پژوهش

بررسی تأثیر تنش آبی بر عملکرد ژنوتیپ‌های داخلی و خارجی گلرنگ جهت کشت در اراضی کم‌بازده حاشیه دریاچه ارومیه نشان داد کمبود آب منجر به کاهش معنی‌دار عملکرد و اجزای عملکرد و محتوای نسبی آب برگ در ژنوتیپ‌های مختلف گلرنگ شد (پاسبان اسلام، ۱۳۹۰). در همین راستا، رحمانی[7] و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند که واکنش ژنوتیپ‌های مختلف گلرنگ در پاسخ به تنش آبی یکسان نبوده و عملکرد دانه در ژنوتیپ‌های گلدشت و پرنیان نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها بالاتر بود. به هرحال، کاهش عملکرد دانه ژنوتیپ‌های گلرنگ تحت تنش آبی در مطالعات قبلی گزارش شده است (جوشن[8] و همکاران، ۲۰۱۹؛ یلوژه[9] و همکاران، ۲۰۲۰). سایر پژوهش‌گران گزارش کرده‌اند که آبیاری با ۵۰ درصد ظرفیت زراعی صفات

1. Leach
2. Climate-smart agriculture
3. Polania
4. Hussain
5. Culha
6. Rahmani
7. Rahmani
8. Joshan
9. Yeloojeh

مورفوفیزیولوژیک گیاه گلرنگ نظیر رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی، نشت الکترولیت، محتوای نسبی آب برگ و نیز عملکرد دانه و روغن را به‌صورت معنی‌داری تحت تأثیر قرار می‌دهد (برتوهیرو[1] و سیلوا[2]، ۲۰۱۷). در آزمایشی دیگر بر روی ۶۴ رقم گلرنگ پژوهش‌گران دریافتند که شاخص سطح برگ، محتوای کلروفیل و شاخص‌های پایداری غشایی گیاه گلرنگ به‌شدت تحت تأثیر شرایط کمبود آب قرار گرفتند، درحالی‌که افزایش قابل‌توجهی در ترکیبات آنتی‌اکسیدانی و فعالیت آسکوربات پراکسیداز و پراکسیداز رخ داد (امینی[3] و همکاران، ۲۰۱۳). آچهال[4] (۲۰۱۶) در بررسی توان تحمل به تنش آبی ژنوتیپ‌های مختلف گلرنگ نشان دادند که محتوای نسبی آب برگ در ژنوتیپ‌های متحمل به‌صورت معنی‌داری بالاتر بود. محتوای نسبی آب برگ شاخص مناسبی برای بیان وضعیت آب گیاهان زراعی در شرایط تنش آبی و در پی آن غربالگری ژنوتیپ‌های متحمل‌تر می‌باشد. در ژنوتیپ‌های متحمل تغییرات محتوای نسبی آب برگ طی تنش آبی نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها کم‌تر بوده و این ژنوتیپ‌ها پایداری عملکرد بالاتری دارند (پاسبان اسلام[5]، ۲۰۱۱). رابطه منفی و معنی‌دار محتوای نسبی آب برگ با دمای کانوپی و همبستگی مثبت آن با عملکرد دانه در گیاه گلرنگ در مطالعات گذشته گزارش شده است (پاسبان اسلام و همکاران، ۱۴۰۰؛ یاری[6] و کشتکار[7]، ۲۰۱۵). رحمانی[8] و همکاران (۲۰۱۹) گزارش کردند در شرایط تنش آبی ترکیب اسیدهای چرب روغن دانه گلرنگ به‌طور معنی‌داری تغییر یافته و منجر به کاهش محتوای اسیدهای چرب غیراشباع شد.

۳. روش‌شناسی پژوهش

آزمایش در مزرعه تحقیقاتی مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج با موقعیت طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۸ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۷ دقیقه شمالی و ارتفاع ۱۳۱۳ متر از سطح دریا در سال‌های زراعی زراعی ۹۸-۱۳۹۷ و ۹۹-۱۳۹۸ اجرا شد. میانگین دما و بارندگی ماهانه برای فصول زراعی مذکور در جدول (۱) ارائه شده است. ترکیب خاک استفاده‌شده به‌صورت دو واحد ماسه بادی، یک واحد خاک زراعی و یک واحد خاک برگ بود و خاک آزمایشی دارای بافت لوم‌رسی- شنی بود که خصوصیات فیزیکوشیمیایی آن در جدول (۲) نشان داده شده است. این مطالعه به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی و در سه تکرار انجام شد. تیمارهای آزمایشی شامل دو سطح آبیاری (آبیاری معمول و کم‌آبیاری) و سه سطح ژنوتیپ گلرنگ شامل ارقام ایرانی پرنیان (زودرس و بهاره، با گل سفید و بدون خار)، گلدشت (زودرس و بهاره با گل قرمز و بدون خار) و ژنوتیپ خارجی قزاقی (بهاره متوسط رس، گل نارنجی و خاردار) بود. برای کاشت گیاه از ستون‌های خاک به ارتفاع ۱۵۰ سانتی‌متر و قطر ۲۳ سانتی‌متر استفاده شد. ابتدا شاخه‌های شش متری لوله‌های PVC-U (پلیکا) در ابعاد طولی یک و نیم متر برش خورد. سپس برای تسهیل ارزیابی نهایی به‌صورت طولی به دو نیم تقسیم و با استفاده از نوار چسب به یکدیگر متصل شدند. پس از آماده‌سازی اولیه لوله‌ها، جوی‌هایی به عمق ۴۰ سانتی‌متر با استفاده از نهرکن در مزرعه ایجاد شد و لوله‌ها به‌صورت عمودی داخل آن جاگذاری (حدود یک متر از لوله‌ها بالاتر از سطح خاک بود) و با خاک مزرعه پر شد. زمان کشت در لوله‌های پلیکا در ۱۵ اسفندماه بود و هر واحد آزمایشی شامل دو لوله (در مجموع ۳۶ لوله) و در هر لوله سه بذر کاشته شد که پس از سبز شدن و استقرار گیاهچه، تنها یک بوته در هر لوله حفظ شد.

1. Bortolheiro
2. Silva
3. Amini
4. Achhale
5. Pasban Eslam
6. Yari
7. Keshtkar
8. Rahmani

جدول ۱. میانگین ماهانه دما و بارندگی ایستگاه هواشناسی منطقه کرج (سال‌های زراعی ۹۹-۱۳۹۸)

پارامتر	سال زراعی	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر
دما (درجه سانتی‌گراد)	۹۸-۹۷	۲۴/۲	۱۷/۳	۱۱	۷	۳/۴	۶/۱	۱۵	۱۴	۱۸/۱	۲۵/۲
	۹۹-۹۸	۲۵	۱۶/۶	۹/۸	۸/۱	۵	۵/۵	۸/۸	۱۵	۲۰/۵	۲۷/۳
بارندگی (میلی‌متر)	۹۸-۹۷	۰	۵	۰	۶	۱۹/۸	۳۰/۲	۱۳/۳	۱۸/۹	۲۰/۱	۸/۲
	۹۹-۹۸	۰	۳۲/۱	۶۵	۳۹/۶	۷۸/۱	۴۳/۱	۷۷	۵۱/۲	۳۱	۸

آبیاری پس از کاشت تا ظرفیت زراعی در تمامی تیمارها انجام شد و اعمال تنش آبی از مرحله طویل‌شدن ساقه آغاز گردید. آبیاری در تیمارهای مختلف براساس رطوبت باقی‌مانده در منطقه توسعه ریشه انجام شد. برای این منظور پایش تغییرات رطوبت خاک به‌صورت روزانه انجام و آبیاری برای تیمارهای بدون تنش (معمول) و تنش آبی به‌ترتیب در رطوبت ۴۰ و ۸۰ درصد تخلیه آب در دسترس انجام گردید (همدانی[1] و همکاران، ۲۰۲۰). جهت پایش روزانه تغییرات رطوبت خاک تعداد پنج حسگر TDR (Time Domain Reflectometry) در هر ستون با فاصله ۳۰ سانتی‌متری جاگذاری شد (6050X1, Trase System 1, Soil moisture Equipment Corp. Santa Barbara, California, USA). در ضمن، برای اعمال یکسان و دقیق آبیاری در تیمارهای مختلف از سیستم آبیاری قطره‌ای استفاده گردید. هم‌چنین، در مرحله چهاربرگی کود محلول فسفر بالا (۱۰-۵۲-۱۰) و کود محلول پتاس بالا (۳۶-۱۲-۱۲) محلول‌پاشی انجام شد؛ هم‌چنیناز مرحله رشد سریع ساقه تا تکمه‌دهی نیز سه مرتبه محلول‌پاشی کود اوره به غلظت پنج در هزار انجام شد. کنترل علف هرز به‌دلیل حجم کم علف به‌صورت وجین دستی انجام گرفت و در طول دروه رشد آفت خاصی مشاهده نشد. نمونه‌برداری برای بررسی صفات فیزیولوژیک پیش از مرحله گلدهی و در یک مرحله انجام شد. پس از رسیدگی کامل در تاریخ پنج مردادماه گیاهان کف‌بر شده و عملکرد دانه براساس توزین کلیه دانه‌های موجود در تک گیاه در هر لوله محاسبه شد. هم‌چنین نمونه‌برداری برای بررسی ترکیب اسیدهای چرب دانه پس از رسیدگی کامل انجام شد.

جدول ۲. خصوصیات فیزیکیوشیمیایی خاک آزمایش

سال زراعی	pH	ماده آلی (درصد)	EC (دسی‌زیمنس بر متر)	نیتروژن (درصد)	فسفر قابل دسترس (پی‌پی‌ام)	پتاسیم قابل دسترس (پی‌پی‌ام)	ظرفیت زراعی (درصد)	نقطه پژمردگی دائم (درصد)	شن (درصد)	سیلت (درصد)	رس (درصد)	بافت
اول	۷/۲	۰/۲۳	۱/۵	۰/۰۶	۱۲/۶	۲۵۶	۲۴	۹	۴۹	۱۹	۳۲	Sandy clay loam
دوم	۷/۱	۰/۱۵	۱/۸	۰/۰۶	۱۰/۷	۲۲۵	۲۰	۸	۵۶	۱۸	۲۶	Sandy clay loam

به‌منظور تهیه عصاره آنزیمی جهت بررسی میزان فعالیت آنزیم در بافت گیاهی مقدار ۰/۰۵ گرم از نمونه تر گیاهی با محلول بافر تریس ۵۰ میلی‌مولار سابیده شده و محلول رویی پس سانتریفیوژ (۱۰۰۰۰g) به‌عنوان عصاره پروتئینی موردسنجش قرار گرفت. هم‌چنین، مقدار پروتئین در عصاره آنزیمی (بافت گیاهی) به‌روش بردفورد و با استفاده از آلبومین گاوی به‌عنوان استاندارد اندازه‌گیری شد (بردفورد[2]، ۱۹۷۶). سنجش فعالیت آنزیم کاتالاز به روش دهینسا[3] و همکاران

1. Hamedani
2. Bradford
3. Dhindsa

(۱۹۸۱) و براساس کاهش جذب نوری نمونه (کاهش مقدار H_2O_2) در طول موج ۲۴۰ نانومتر انجام شد. هم‌چنین جهت تعیین فعالیت آنزیم پراکسیداز از مخلوط بافر تریس ۱۰۰ میلی‌مولار، آب اکسیژنه پنج میلی‌مولار و پروگالل ۱۰ میلی‌مولار استفاده گردید و فعالیت آنزیم براساس تغییرات جذب نوری در طول موج ۴۲۵ نانومتر محاسبه شد (کار[1] و میشرا[2]، ۱۹۷۶).

برای اندازه‌گیری محتوی مالون‌دی‌آلدهید مقدار ۰/۱ گرم نمونه گیاهی با سه میلی‌لیتر محلول تری‌کلرواستیک (۱۰ درصد) مخلوط و سانتریفیوژ شد. سپس محلول رویی با ۲- تری‌بوتریک‌اسید مخلوط و به‌مدت ۱۰ دقیقه حرارت داده شد و پس از سانتریفیوژ مقدار جذب در طول موج ۵۳۲ نانومتر قرائت شد (دووس[3] و اسکات[4]، ۱۹۹۱). اندازه‌گیری محتوای پرولین مطابق با روش بیتس[5] و همکاران (۱۹۷۳) انجام شد. به‌صورت مختصر، عصاره‌گیری برای سنجش محتوای پرولین با سولفوسالیسیک‌اسید انجام و سپس عصاره با دو میلی‌لیتر محلول ناین‌هیدرین و استیک‌اسید مخلوط شد. در ادامه میزان جذب در فاز رویی در طول موج ۵۲۰ نانومتر خوانده شده و مقدار پرولین با استفاده از معادله خط محاسبه گردید.

محتوای نسبی آب برگ مطابق روش سوریها[6] و همکاران (۲۰۰۴) اندازه‌گیری شد. برای این منظور نمونه‌های برگ پس از توزین به‌مدت ۲۴ ساعت در آب نگه‌داری شدند و در ادامه در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد خشک و وزن شدند. در ادامه محتوای نسبی آب برگ براساس نسبت میزان رطوبت برگ در حالت عادی به میزان آن در حالت آماس محاسبه شد. شاخص SPAD با استفاده از دستگاه کلروفیل‌متر SPAD-502 (Minolta, Japan) اندازه‌گیری شد. هم‌چنین، دمای کانوپی با استفاده از دماسنج مادون قرمز T۲-۸۲۵ (Testo, Italy) اندازه‌گیری شد.

ترکیب اسیدهای چرب روغن دانه گلرنگ با استفاده از دستگاه کروماتوگرافی گازی اندازه‌گیری شد. برای این منظور اسیدهای چرب روغن با استفاده از هگزان و متیلات‌سدیم به شکل اسید چرب متیل‌استری (FAME) تبدیل شدند. آنالیز اسیدهای چرب با استفاده از دستگاه کروماتوگرافی گازی مدل Varian CP-3800 (Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA) مجهز به آشکارگر شعله‌ای و ستون کاپیلاری (CP-Sil 88, 0.2µm, 0.25mm×50m) انجام شد. شناسایی پیک‌ها از طریق تطابق زمان تأخیر با کروماتوگرام استاندارد (FAME) صورت گرفت و مقادیر مربوطه براساس مساحت زیر پیک به‌صورت درصد محاسبه شد (ریاحی سامانی[7] و همکاران، ۲۰۱۸).

پیش از تجزیه مرکب نتایج، یکنواختی واریانس داده‌های حاصل از دو سال با آزمون بارتلت بررسی شد. در نهایت تجزیه مرکب داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS (IBM-SPSS 26) و مقایسه میانگین داده‌ها براساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح پنج درصد انجام شد. برای مقایسه میانگین اثرات متقابل نیز از روش برش‌دهی استفاده شد. از نرم‌افزار RStudio (R 3.5.1) برای رسم نقشه حرارتی استفاده گردید.

۴. یافته‌های پژوهش

۴. ۱. فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اعمال تنش آبی تأثیر معنی‌داری بر صفات موردبررسی در سطح احتمال یک درصد داشت (جدول ۲). هم‌چنین مقادیر صفات موردبررسی در ژنوتیپ‌های مختلف به‌جز فعالیت آنزیم کاتالاز و شاخص SPAD دارای

1. Kar
2. Mishra
3. De Vos
4. Schat
5. Bates
6. Suriya-arunroj
7. Reiahisamani

تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد بود. علاوه این، تأثیر متقابل آبیاری× ژنوتیپ به‌غیر از فعالیت آنزیم کاتالاز و شاخص SPAD بر تمامی صفات بررسی شده معنی‌دار بود (جدول ۲). اعمال تنش آبی، میزان فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز را به‌ترتیب ۱ و ۲/۵ واحد آنزیمی افزایش داد (جدول ۳). میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز در ژنوتیپ‌های مختلف متفاوت بود و بیش‌ترین مقدار مربوط در شرایط نرمال و تنش در ژنوتیپ گلدشت مشاهده شد. با این‌حال بیش‌ترین مقدار افزایش فعالیت آنزیمی تحت تیمار تنش آبی در ژنوتیپ قزاقی به میزان ۵/۳ واحد به‌دست آمد (جدول ۴).

جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی موردبررسی گلرنگ تحت تنش آبی

		میانگین مربعات									
منبع تغییرات	درجه آزادی	کاتالاز	پراکسیداز	پروتئین بافت	هیدروژن پراکسید	مالون‌دی‌آلدهید	پرولین	محتوای نسبی آب	شاخص SPAD	دمای کانوپی	عملکرد دانه
سال	۱	۰/۲۵^{ns}	۷/۱۱^{ns}	۰/۰۰۵^{ns}	۵/۵۷^{ns}	۰/۰۱۷^{ns}	۳/۳۵^{ns}	۲۲/۸**	۱۱/۴*	۰/۴۲^{ns}	۰/۵۰۲^{ns}
سال× تکرار	۲	۰/۰۲۶	۰/۰۷۵	۰/۰۰۳	۱/۴۴	۰/۰۱۴	۰/۰۰۷	۱/۳۳	۸/۹۴	۰/۲۵	۰/۲۴۳
بلوک	۲	۰/۰۸^{ns}	۰/۸۲^{ns}	۰/۰۵۵^{ns}	۲۴/۳^{ns}	۰/۰۰۳^{ns}	۱۱/۲^{ns}	۳/۱۱*	۰/۴۸^{ns}	۱/۰۵*	۰/۱۸^{ns}
آبیاری	۱	۸/۸**	۶۴**	۱/۲**	۱۲۰۲**	۰/۲**	۴۶۱۰**	۱۱۸۶**	۶۵۱**	۵۲/۵**	۸۶/۷**
ژنوتیپ	۲	۲/۰۳^{ns}	۲۵۸**	۰/۴۲**	۶۱۲**	۰/۰۴۳*	۳۲۶**	۱۰/۳**	۲/۲۸^{ns}	۲۳/۳**	۲/۰۲**
آبیاری×ژنوتیپ	۲	۰/۴۵^{ns}	۱۷/۷**	۰/۸۱**	۱۱۱**	۰/۱۳**	۲۶۷**	۱۱/۲**	۵/۱۷^{ns}	۲/۹۶**	۰/۴۴^{ns}
خطا	۲۵	۰/۰۸۲	۲/۰۶	۰/۰۲	۱۰/۴	۰/۰۱	۳/۹	۰/۸۹	۲/۴	۰/۲۳	۰/۲۷
ضریب تغییرات (درصد)		۴/۵	۴/۷	۲/۹	۲/۴	۳	۱۶/۸	۱/۳	۱/۳	۰/۹	۱۰/۱

**، *، ns: معنی‌دار در سطح ۱ و ۵ درصد و غیرمعنی‌دار.

ادامه جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی موردبررسی گلرنگ تحت تنش آبی

		میانگین مربعات									
منبع تغییرات	درجه آزادی	پالمتیک اسید	پالمیتولیک اسید	استاریک اسید	اولئیک اسید	لینولئیک اسید	لینولنیک اسید	آراشیدیک اسید	گادولئیک اسید	بهنیک اسید
سال	۱	۰/۰۶۲**	۰/۰۰۰۳**	۰/۰۲۵**	۰/۱۰*	۲/۵۴**	۰/۰۰۰۳**	۰/۰۰۰۱**	۰/۰۰۰۱**	۰/۰۰۰۱**
سال× تکرار	۲	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۵	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۲
بلوک	۲	۰/۰۰۰۴^{ns}	۰/۰۰۰۰۲^{ns}	۰/۰۰۰۰۲^{ns}	۰/۰۵۳^{ns}	۰/۰۰۲^{ns}	۰/۰۰۰۳^{ns}	۰/۰۰۰۳^{ns}	۰/۰۰۰۰۲^{ns}	۰/۰۰۰۵^{ns}
آبیاری	۱	۰/۴۱**	۰/۰۰۲**	۰/۳۱۴**	۱/۲۴**	۲۹/۲**	۰/۰۰۰۸**	۰/۰۵۹**	۰/۰۱۵**	۰/۰۰۰۳**
ژنوتیپ	۲	۷/۷۶**	۰/۰۰۰۳**	۰/۷۵**	۲۲/۳**	۱۵/۳**	۰/۰۰۳**	۰/۰۸۹**	۰/۰۰۳**	۰/۰۴**
آبیاری× ژنوتیپ	۲	۲/۰۲**	۰/۰۰۳**	۰/۷۷**	۲/۳۸**	۰/۸۸**	۰/۰۰۷**	۰/۱۲۱**	۰/۰۰۵**	۰/۱۳**
خطا	۲۵	۰/۰۰۱	<۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۱	۰/۰۲	۰/۰۹	<۰/۰۰۰۷	<۰/۰۰۰۸	<۰/۰۰۰۴	<۰/۰۰۰۷
ضریب تغییرات (درصد)		۱/۸	۴/۲	۲/۴	۱/۳	۰/۳	۵/۰۸	۷/۸	۴/۷	۹/۲

**، *، ns: معنی‌دار در سطح ۱ و ۵ درصد و غیرمعنی‌دار.

۴. ۲. محتوای پروتئین، مالون دی‌آلدهید و پرولین

محتوای پروتئین گلرنگ تحت تیماری تنش به‌طور معنی‌داری کاهش پیدا کرد. ژنوتیپ‌های مختلف گلرنگ نیز از نظر محتوای پروتئین دارای تفاوت معنی‌دار بودند (جدول ۳). ژنوتیپ پرنیان دارای بیش‌ترین مقدار پروتئین در شرایط نرمال و تنش بود و تحت تیمار تنش محتوای پروتئین در این ژنوتیپ بدون تغییر باقی ماند (جدول ۴). علاوه بر این محتوای پراکسیدهیدروژن گلرنگ در اثر تنش آبی افزایش معنی‌داری داشت. با این‌حال، ژنوتیپ پرنیان کم‌ترین مقدار پراکسید هیدروژن در شرایط نرمال و تنش را داشت. ضمن این‌که کم‌ترین میزان افزایش پراکسیدهیدروژن در اثر تنش آبی در این ژنوتیپ به‌دست آمد (جدول ۴). محتوی مالون‌دی‌آلدهید و پرولین گلرنگ تحت تنش آبی به‌طور معنی‌داری افزایش پیدا کرد. ژنوتیپ‌های موردبررسی نیز از نظر محتوای مالون‌دی‌آلدهید و پرولین نیز دارای تفاوت معنی‌دار بودند (جدول ۳). تحت شرایط نرمال کم‌ترین مقدار مالون‌دی‌آلدهید و پرولین در ژنوتیپ پرنیان مشاهده شد. تحت شرایط تنش بیش‌ترین مقدار مالون‌دی‌آلدهید و پرولین با میانگین ۱/۲ و ۳۳/۵ میکروکول بر گرم ماده تر به‌ترتیب در ژنوتیپ‌های پرنیان و قزاقی به‌دست آمد.

جدول ۳. مقایسه میانگین اثرات اصلی آبیاری و ژنوتیپ بر صفات فیزیولوژیک گلرنگ

تیمار	کاتالاز (واحد در میلی گرم پروتئین)	پراکسیداز (واحد در میلی گرم پروتئین)	پروتئین (میلی گرم بر گرم وزن تر)	هیدروژن پراکسید (میکرومول بر گرم وزن تر)	مالون‌دی‌آلدهید (نانومول بر گرم وزن تر)	پرولین (میکرومول بر گرم وزن تر)	محتوای نسبی آب (درصد)	شاخص SPAD	دمای کانوپی (درجه سانتی گراد)	عملکرد دانه (گرم در گیاه)
آبیاری										
معمول	۳/۲b	۱۴/۲b	۲/۲a	۵۸/۶b	۰/۸۳b	۱/۵b	۷۹/۵a	۵۵b	۳۰/۴b	۴/۳۳a
تنش آبی	۴/۲a	۱۶/۸a	۱/۸b	۷۰/۱a	۱/۰۱a	۲۴/۱a	۶۸b	۶۳/۵a	۳۲/۸a	۱/۲۳b
ژنوتیپ										
پرنیان	۳/۲	۱۰/۶c	۲/۲a	۵۶/۲b	۰/۹۹a	۷/۳c	۷۳b	۵۸/۹	۳۲/۵a	۲/۳۹b
گلدشت	۳/۷	۱۹/۸a	۲b	۶۹/۳a	۰/۹۰ab	۱۳/۴b	۷۳/۴b	۵۹/۲	۳۲/۳a	۲/۷۵b
قزاقی	۴	۱۶b	۱/۸c	۶۷/۶a	۰/۸۷b	۱۷/۷a	۷۴/۸a	۵۹/۸	۳۰b	۳/۲۱a

میانگین‌ها با حروف یکسان فاقد تفاوت معنی‌دار براساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد می‌باشند.

۴. ۳. محتوای نسبی آب برگ، شاخص SPAD، عملکرد دانه

محتوای نسبی آب برگ و شاخص SPAD گلرنگ در اثر اعمال تنش آبی به‌ترتیب به‌طور معنی‌داری کاهش و افزایش یافت. ژنوتیپ‌های موردبررسی نیز از نظر محتوای نسبی آب برگ دارای تفاوت معنی‌دار بودند و بیش‌ترین مقدار آن در ژنوتیپ قزاقی مشاهده شد. هرچند شاخص SPAD در ژنوتیپ‌های مختلف تفاوت معنی‌داری در شرایط نرمال و تنش نشان نداد (جدول ۳). تحت شرایط نرمال، ژنوتیپ گلدشت بیش‌ترین محتوای نسبی آب برگ را داشت، درحالی‌که تحت شرایط تنش بیش‌ترین مقدار این صفت در ژنوتیپ قزاقی به‌دست آمد (جدول ۴). با کاهش محتوای نسبی آب برگ، دمای کانوپی گلرنگ تحت شرایط تنش حدود دو درجه سانتی‌گراد افزایش پیدا کرد. تحت شرایط تنش کم‌ترین و بیش‌ترین دمای کانوپی گلرنگ با میانگین ۳۰/۷ و ۳۴/۲ درجه سانتی‌گراد به‌ترتیب در ژنوتیپ‌های پرنیان و قزاقی ثبت شد (جدول ۴) کاهش محتوای نسبی آب برگ در شرایط تنش آبی منجر به کاهش بیش از ۷۰ درصدی عملکرد دانه در ژنوتیپ‌های گلرنگ شد. در تیمار آبیاری معمول عملکرد دانه ژنوتیپ‌های گلرنگ فاقد تفاوت معنی‌دار بودند، درحالی‌که در شرایط تنش آبی عملکرد ژنوتیپ قزاقی به‌صورت معنی‌داری بالاتر بود و شرایط پایدارتری نسبت به ارقام ایرانی نشان داد (جدول ۴).

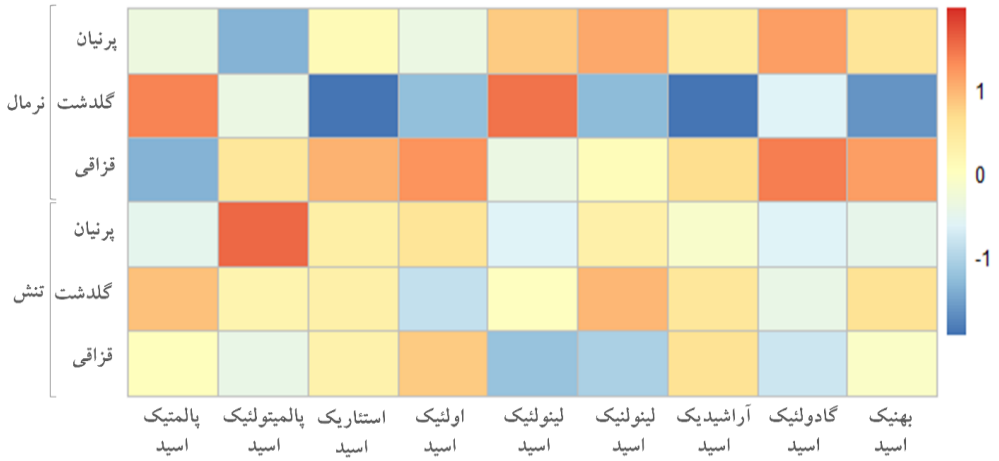
جدول ٤. مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری× ژنوتیپ بر صفات فیزیولوژیک گلرنگ.

تیمار		کاتالاز (واحد در میلی گرم پروتئین)	پراکسیداز (واحد در میلی گرم پروتئین)	پروتئین (میلی گرم بر گرم وزن تر)	هیدروژن پراکسید (میکرو مول بر گرم وزن تر)	مالون‌دی‌آلدهید (نانو مول بر گرم وزن تر)	پرولین (میکرو مول بر گرم وزن تر)	محتوای نسبی آب (درصد)	شاخص SPAD	دمای کانوپی (درجه سانتی گراد)	عملکرد دانه (گرم در گیاه)
آبیاری معمول	پرنیان	۲/۷	۹/۴c	۲/۲ab	۵۳/۹c	۰/۷۷c	۰/۹۵d	۷۸/۷b	۵۵/۳	۳۰/۸c	۳/۹۶a
	گلدشت	۳/۵	۱۹/۷a	۲/۱bc	۵۸/۴b	۰/۸۶bc	۱/۷d	۸۰/۱a	۵۴/۳	۳۱/۲c	۴/۴۸a
	قزاقی	۳/۴	۱۳/۴b	۲/۳a	۶۰/۲b	۰/۸۵bc	۱/۹d	۷۹/۶ab	۵۵/۷	۲۹/۲d	۴/۵۶a
تنش آبی	پرنیان	۳/۸	۱۱/۹b	۲/۲ab	۶۱/۶b	۱/۲a	۱۳/۷c	۶۷/۴d	۶۲/۶	۳۴/۲a	۰/۸۱c
	گلدشت	۴	۲۰a	۲c	۷۵a	۰/۹۴b	۲۵/۲b	۶۶/۷d	۶۴/۲	۳۳/۴b	۱/۰۲c
	قزاقی	۴/۷	۱۸/۷a	۱/۴d	۷۷a	۰/۹۰bc	۳۳/۵a	۷۰c	۶۳/۹	۳۰/۷c	۱/۸۶b

میانگین‌ها با حروف یکسان فاقد تفاوت معنی‌دار براساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد می‌باشند.

۴. ۴. محتوی اسیدهای چرب

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اعمال تنش آبی تأثیر معنی‌داری بر محتوای اسیدهای چرب روغن گلرنگ در سطح احتمال یک درصد داشت (جدول ۲). شکل (۱) تغییرات محتوی اسیدهای چرب در ژنوتیپ‌های مختلف تحت شرایط نرمال و تنش را به‌صورت نقشه حرارتی (رنگ آبی: کم تا رنگ قرمز: زیاد) نشان می‌دهد. تنش آبی محتوی اسیدهای چرب اشباع استئاریک و غیراشباع اولئیک و لینولنیک را افزایش و در مقابل مقدار لینولئیک‌اسید را کاهش داد، اما به‌طورکلی نسبت اسیدهای چرب اشباع به غیراشباع تحت تنش آبی افزایش یافت. محتوی اسیدهای چرب در ژنوتیپ‌های موردبررسی نیز دارای مقادیر متفاوت بود. تحت شرایط نرمال، بیش‌ترین مقدار استئاریک‌اسید و اولئیک‌اسید در ژنوتیپ قزاقی، لینولئیک‌اسید در ژنوتیپ گلدشت و لینولنیک‌اسید در ژنوتیپ پرنیان مشاهده شد. تحت شرایط تنش، کم‌ترین مقدار پالمیتیک‌اسید در ژنوتیپ پرنیان و بیش‌ترین مقدار لینولئیک‌اسید و لینولنیک‌اسید نیز در ژنوتیپ گلدشت ثبت شد (شکل ۱).



شکل ۱. تغییرات محتوای اسیدهای چرب روغن دانه گلرنگ در ژنوتیپ‌های پرنیان، گلدشت و قزاقی تحت شرایط نرمال و تنش

۵. بحث

تفاوت میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی بین ژنوتیپ‌ها و ارقام حساس و متحمل در گیاهان زراعی مختلف گزارش شده است (ایمتیاز[1] و همکاران، ۲۰۱۵؛ باندیپا[2] و همکاران، ۲۰۱۹؛ نصیرزاده[3] و همکاران، ۲۰۲۱). دلیل احتمالی این تفاوت تنوع ژنتیکی میان ژنوتیپ‌ها و بیان متفاوت ژن‌های کدکننده پروتئین‌های آنزیمی است (نصیرزاده و همکاران، ۲۰۲۱)، که می‌تواند یکی از دلایل واکنش و عملکرد متفاوت ژنوتیپ‌های حساس و متحمل در پاسخ به تنش‌های محیطی باشد. هرچند درک بهتر این تفاوت نیازمند مطالعه عمیق بیوشیمیایی و مولکولی ژنوتیپ‌های مختلف است. به هر حال، مکانیسم‌های سازگاری گیاهان به تنش‌های محیطی شامل تغییرات موفوفیزیولوژیکی و بیوشیمیایی مانند پتانسیل اسمزی، هدایت روزنه‌ای و سیستم آنتی‌اکسیدانی است (کاپور[4] و همکاران، ۲۰۲۰). افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کاتالاز و پراکسیداز یکی از راه‌کارهای اصلی مقابله با افزایش گونه‌های فعال اکسیژن مانند پراکسید هیدروژن در اثر تنش آبی می‌باشد (بوریسو[5] و همکاران، ۲۰۱۳). جوشن[6] و همکاران (۲۰۱۹) در بررسی خصوصیات فیزیولوژیک ارقام ایرانی گلرنگ نشان دادند میزان فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز در شرایط قطع آبیاری به‌صورت معنی‌داری افزایش پیدا کرد. مطالعات صورت‌گرفته در زمینه فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در گیاهان تحت تنش نشانگر نقش این سیستم در افزایش تحمل به تنش‌های محیطی است (الوز[7] و همکاران، ۲۰۱۴). در مطالعه حاضر نیز ارزیابی میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در ژنوتیپ‌های مختلف گلرنگ نشان داد افزایش فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز یکی از مکانیسم‌های افزایش تحمل به تنش در این گیاه است.

تنش‌های محیطی منجر به تغییر غلظت بسیاری از ترکیبات بافتی در گیاهان می‌شود که برخی از آن‌ها مکانیسم‌های دفاعی گیاه برای کاهش اثرات تنش می‌باشد. تحت تنش آبی، افزایش انتقال الکترون به مولکول اکسیژن سبب افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن مانند هیدروکسیل، سوپراکسید و پراکسید می‌شود (لامبرت[8] و براند[9]، ۲۰۰۹). تجمع مالون‌دی‌آلدهید و افزایش مقدار پراکسید هیدروژن در اثر پراکسیداسیون لیپید صورت می‌گیرد که سبب افزایش نشت الکترولیت سلولی شده و کاهش پایداری غشا را به‌دنبال دارد (قاسمی گلعذانی[10]، ۲۰۱۹). بنابراین، این ترکیبات به‌طور معمول شاخص تنش اکسیداتیو محسوب شده و عموماً مقدار این ترکیبات در ژنوتیپ و ارقام متحمل به تنش کم‌تر می‌باشد (یداوت[11] و همکاران، ۲۰۱۶). در مقابل، گیاهان با افزایش تجمع اسمولیت‌هایی نظیر پرولین به‌دنبال کاهش اثرات مخرب ناشی از تنش آبی هستند. افزایش تجمع پرولین در شرایط تنش سبب محافظت از غشای سلولی، پروتئین و آنزیم‌های سیتوپلاسمی و مهار گونه‌های اکسیژن فعال می‌گردد (کاویکیشور[12] و همکاران، ۲۰۱۵). در مطالعه جوشن[13] و همکاران (۲۰۱۹)، اعمال تنش آبی منجر به افزایش معنی‌دار تجمع پرولین در ارقام مختلف گلرنگ شد. خلیلی و نقوی (۱۳۹۷) در بررسی پاسخ فیزیولوژیک و پروتئینی ارقام مختلف گندم به تنش آبی گزارش کردند در بین متابولیت‌های موردبررسی مقدار پرولین بیش‌ترین تغییر را در شرایط تنش آبی نشان داد و مقدار این اسید آمینه در ارقام متحمل نسبت

1. Imtiaz
2. Bandeppa
3. Nasirzadeh
4. Kapoor
5. Borisov
6. Joshan
7. Ellouzi
8. Lambert
9. Brand
10. Ghassemi-Golezani
11. Udawat
12. Kavi Kishor
13. Joshan

به ارقام حساس بالاتر بود. بنابراین، تجمع اسید آمینه پرولین با کاهش پتانسیل اسمزی و حفظ فشار تورمی سلول راه‌کاری اصلی برای کاهش اثرات مخرب و بهبود سازگاری گیاه به تنش آبی می‌باشد.

کاهش عملکرد دانه گلرنگ تحت تنش آبی در مطالعات پیشین گزارش شده است. رحمانی[1] و همکاران (۲۰۱۹) گزارش کردند تنش آبی از مرحله گلدهی سبب کاهش ۲۵ درصد عملکرد دانه گلرنگ شد. هم‌چنین در مطالعه جوشن[2] و همکاران (۲۰۱۹)، تنش آبی از مرحله پرشدن دانه کاهش حدود ۳۰ درصد عملکرد دانه گلرنگ را در پی داشته است. در مطالعه حاضر با توجه به آغاز تنش از مرحله طویل‌شدن ساقه از یک‌سو و از سوی دیگر کشت کنترل‌شده در لوله‌های پلیکا که شرایط متفاوتی نسبت به کشت مزرعه از نظر حجم خاک در دسترس گیاه و در پی آن حجم آب قابل‌جذب برای گیاه ایجاد کرده است و همین تفاوت دلیل احتمالی کاهش شدیدتر عملکرد گلرنگ نسبت به مطالعات قبلی است.

محتوای نسبی آب برگ شاخص بسیار مناسبی برای غربالگری ارقام متحمل به خشکی است که توانایی بالاتری در حفظ آب در شرایط تنش آبی دارند. این ویژگی می‌تواند سبب استمرار رشد گیاه در تنش آبی باشد (شاکل[3] و همکاران، ۲۰۱۱). هرچند پاسبان اسلام (۱۳۹۰) گزارش کرد که محتوای نسبی آب برگ و هدایت روزنه‌ای همبستگی بالایی با یکدیگر داشته و کاهش محتوای نسبی آب برگ می‌تواند با کاهش هدایت روزنه‌ای و جذب دی‌اکسیدکربن افت فتوسنتز را به‌دنبال داشته باشد. با این‌حال، گزارش شده است که ارقام متحمل به خشکی مقادیر بالاتری از محتوای نسبی آب برگ را نشان می‌دهند (جیانگ[4] و هانگ[5]، ۲۰۰۱). پاسبان اسلام و همکاران (۱۴۰۰) در مطالعه پاسخ فیزیولوژیک ژنوتیپ‌های گلرنگ گزارش کردند که تنش آبی در مرحله گلدهی منجر به کاهش معنی‌دار محتوای نسبی آب برگ گلرنگ شد. هم‌چنین، شیراسماعیلی و همکاران (۱۳۹۷) در ارزیابی تأثیر تنش آبی بر ارقام مختلف گلرنگ در شرایط اقلیمی اصفهان نشان دادند بروز خشکی آخر فصل سبب کاهش معنی‌دار محتوای نسبی آب برگ و عملکرد بذر و روغن گلرنگ گردید. در مطالعه حاضر نیز اعمال تنش آبی منجر به کاهش معنی‌دار محتوای نسبی آب برگ در تمامی ژنوتیپ‌های بررسی شد. کاهش محتوای نسبی آب در اثر تنش آبی افزایش معنی‌دار دمای کانوپی را به‌دنبال داشت.

کاهش میزان تعرق از طریق بستن روزنه‌ها به‌منظور حفظ محتوای نسبی آب یکی از مکانیسم‌های اصلی تحمل به خشکی در گیاهان می‌باشد که سبب افزایش دمای کانوپی و حفظ آب برگ می‌شود (کریمی‌زاده[6] و محمدی[7]، ۲۰۱۱). در همین راستا، رحمانی و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند دمای کانوپی گلرنگ در تیمار تنش آبی به‌صورت معنی‌داری افزایش پیدا کرد. در مطالعات گذشته کاهش معنی‌دار شاخص کلروفیل و رنگدانه‌های فتوسنتزی تحت تنش آبی گزارش شده است (جوشن و همکاران، ۲۰۱۹؛ پاسبان اسلام و همکاران، ۱۴۰۰). با این‌حال، اعمال تنش آبی افزایش معنی‌دار شاخص SPAD را در این مطالعه به‌دنبال داشت. گزارش شده است که تنش آبی ملایم می‌تواند منجر به افزایش نسبی شاخص SPAD گردد. با افزایش تنش آبی میزان کلروفیل برگ کاهش یافته اما نسبت کلروفیل a به کلروفیل b افزایش می‌یابد. این امر سبب افزایش تیرگی برگ‌ها شده و منجر به افزایش شاخص SPAD می‌شود (قدمی و همکاران، ۱۳۹۳).

عوامل ژنتیکی و نیز محیطی مختلف می‌توانند در ترکیب اسیدهای چرب روغن دانه مؤثر باشند. محتوی متفاوت اسیدهای

1. Rahmani
2. Joshan
3. Shakeel
4. Jiang
5. Huang
6. Karimizadeh
7. Mohammadi

چرب اشباع و غیراشباع در ژنوتیپ‌های مختلف در سایر گیاهان دانه روغنی نیز گزارش شده است (سپاسیبیونک[1] و همکاران، ۲۰۲۰). هم‌چنین، عوامل محیطی و تأثیر متقابل محیط بر ژنتیک نقش تعیین‌کننده‌ای در ترکیب اسیدهای چرب در گیاهان دانه روغنی ایفا می‌کنند (بروک[2] و همکاران، ۲۰۲۰). روغن دانه گلرنگ به‌طور عمده از اسیدهای چرب اشباع پالمتیک و استئاریک و و اسیدهای چرب غیر اشباع اولئیک، لینولئیک و لینولنیک تشکیل شده است (هراتی[3] و همکاران، ۲۰۱۲). با وجود این‌که محتوای روغن دانه و ترکیب اسیدهای چرب بیش‌تر تحت تأثیر ژنتیک گیاه قرار دارد، اما تغییرات در ترکیب اسیدهای چرب در ژنوتیپ‌های مختلف و نیز شرایط محیطی متفاوت مشاهده شده است (بالویی[4] و همکاران، ۲۰۱۳). در مطالعه خلعتبری[5] و همکاران (۲۰۲۲) بر روی تأثیر شرایط محیطی بر ترکیب اسیدهای چرب روغن دانه کلزا مشاهده شد که میزان اسیدهای چرب اولئیک و لینولئیک به‌ترتیب ۲ و ۸ درصد تحت تنش آبی نسبت به شرایط نرمال کاهش پیدا کرد. رحمانی[6] و همکاران (۲۰۱۹) نیز کاهش محتوای لینولئیک اسید تحت تنش آبی در ژنوتیپ‌های مختلف گلرنگ را گزارش کردند. کاهش دوره پرشدن دانه در اثر رسیدگی زودهنگام دانه در شرایط تنش آبی و کاهش زمان تبدیل اولئیک‌اسید به لینولئیک‌اسید اصلی‌ترین دلیل کاهش میزان این اسید چرب تحت شرایط خشکی عنوان شده است (نظری[7] و همکاران، ۲۰۱۷). علاوه بر این، تحت شرایط تنش آبی افزایش دمای کانوپی گیاه در مرحله پرشدن دانه، منجر به تغییر ترکیب اسیدهای چرب روغن دانه شده و کیفیت و کمیت آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد (کرپس[8] و همکاران، ۲۰۱۷). با توجه به کیفیت و ارزش تغذیه‌ای روغن عموماً براساس ترکیب اسیدهای چرب آن تعیین می‌گردد، بنابراین توجه به عوامل مختلف محیطی و ژنتیکی مؤثر در آن باید در برنامه به‌زراعی مدنظر قرار گیرد.

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

تحت تنش آبی پراکسیداسیون لیپید و تجمع پراکسید هیدروژن منجر به افزایش ۱-۲/۵ واحدی فعالیت آنتی‌اکسیدانی در ژنوتیپ‌های گلرنگ شد. در میان شاخص‌های فیزیولوژیک پرولین بیش‌ترین تغییرات را نسبت به شرایط خشکی نشان داد و تمامی ژنوتیپ‌ها افزایش قابل‌توجهی داشت. با کاهش محتوای نسبی آب برگ در اثر تنش آبی و افزایش دمای کانوپی عملکرد دانه گلرنگ حدود ۷۰ درصد کاهش یافت. با این‌حال، ژنوتیپ قزاقی کم‌ترین کاهش محتوای نسبی آب برگ و عملکرد دانه را تحت تنش آبی داشت، که دلیل احتمالی آن وجود سیستم ریشه‌ای توسعه‌یافته و توان بالای جذب آب در این ژنوتیپ می‌باشد. به‌علاوه، ترکیب اسیدهای چرب روغن دانه گلرنگ تحت تنش آبی با افزایش نسبت اسیدهای چرب اشباع/ غیراشباع تغییر یافت. بنابراین علاوه بر تحمل به تنش و پایداری عملکرد، تغییرات بیوشیمیایی مؤثر در کیفیت روغن نیز باید در انتخاب ژنوتیپ مناسب موردتوجه قرار گیرد.

۷. تشکر و قدردانی

از حمایت‌های مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر و پژوهشگاه ملی مهندسی ژنتیک و زیست‌فناوری که یاری‌بخش ما در اجرای مطلوب این پژوهش بودند، تشکر و قدردانی می‌گردد.

1. Spasibionek
2. Brock
3. Harrathi
4. Bellaloui
5. Khalatbari
6. Rahmani
7. Nazari
8. Kreps

۸. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۹. منابع

پاسبان اسلام، بهمن. (۱۳۹۰). تأثیر تنش خشکی بر عملکرد دانه و روغن ژنوتیپ‌های پاییزه گلرنگ. *علوم گیاهان زراعی ایران*، ۴۲(۲)، ۲۷۵-۲۸۳.

پاسبان اسلام، بهمن، صادقی بختوری، امیررضا، جباری، حمید، و بای بوردی، احمد. (۱۴۰۰). پاسخ فیزیولوژیک و زراعی ژنوتیپ‌های امیدبخش گلرنگ به تنش کمبود آب آخر فصل. *علوم گیاهان زراعی ایران*، ۵۲(۱)، ۱۲۳-۱۳۰.

خلیلی، معروف و نقوی، محمدرضا (۱۳۹۷). ارزیابی پاسخ فیزیولوژیکی و پروتئینی ارقام متحمل و حساس گندم بهاره به غلظت‌های مختلف تنش خشکی. *فصلنامه علمی ژنتیک نوین*، ۱۳(۱)، ۱۰۳-۱۱۸.

شیراسماعیلی، غلامحسین، مقصودی مود، علی اکبر، خواجویی نژاد، غلامرضا، و عبدالشاهی، روح اله. (۱۳۹۷). عملکرد و درصد روغن ارقام گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.) در کشت بهاره و تابستانه تحت تأثیر تنش خشکی. *اکوفیزیولوژی گیاهان زراعی*، ۱۲(۴۶)، ۲۳۷-۲۵۲.

قدمی فیروز آبادی، علی، رایینی، محمود، شاه‌نظری، علی و زارع ابیانه، حمید (۱۳۹۳). تغییرات شاخص کلروفیل، شاخص سطح برگ و پارامترهای ریشه گیاه آفتابگردان در کم‌آبیاری تنظیم شده و کم‌آبیاری ناقص ریشه. *نشریه فنآوری تولیدات گیاهی*، ۱۴(۱)، ۶۹-۷۹.

یاری، پروانه، و کشتکار، امیرحسین (۱۳۹۵). همبستگی بین صفات و تجزیه علیت عملکرد دانه گلرنگ بهاره در شرایط تنش رطوبتی. *پژوهش‌های زراعی ایران*، ۱۴(۳)، ۴۲۷-۴۳۷.

References

Achhale, D. (2016). Screening of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) Genotypes for drought tolerance. *M.Sc. Thesis*, Madhya Pradesh: Rajmata Vijayaraje Scindia Agricultural University.

Amini, H., Arzani, A., & Bahrami, F. (2013). Seed yield and some physiological traits of safflower as affected by water deficit stress. *International Journal of Plant Production*, *7*(3), 597-614.

Bandeppa, S., Paul, S., Thakur, J. K., Chandrashekar, N., Umesh, D. K., Aggarwal, C., & Asha, A. D. (2019). Antioxidant, physiological and biochemical responses of drought susceptible and drought tolerant mustard (*Brassica juncea* L.) genotypes to rhizobacterial inoculation under water deficit stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, *143*, 19-28.

Bates, L. S., Waldren, R. P., & Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and soil*, *39*(1), 205-207.

Bellaloui, N., Mengistu, A., & Kassem, M. A. (2013). Effects of genetics and environment on fatty acid stability in soybean seed. *Food and Nutrition Sciences*, *4*(9), 165-175.

Borisov, V. B., Forte, E., Davletshin, A., Mastronicola, D., Sarti, P., & Giuffrè, A. (2013). Cytochrome bd oxidase from Escherichia coli displays high catalase activity: an additional defense against oxidative stress. *FEBS letters*, *587*(14), 2214-2218.

Bortolheiro, F. P., & Silva, M. A. (2017). Physiological response and productivity of safflower lines under water deficit and rehydration. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, *89*, 3051-3066.

Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical biochemistry*, *72*(1-2), 248-254.

Brock, J. R., Scott, T., Lee, A. Y., Mosyakin, S. L., & Olsen, K. M. (2020). Interactions between genetics and environment shape Camelina seed oil composition. *BMC Plant Biology*, *20*, 1-15.

Culha Erdal, Ş., Eyidoğan, F., & Ekmekçi, Y. (2021). Comparative physiological and proteomic analysis of cultivated and wild safflower response to drought stress and re-watering. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, *27*(2), 281-295.

De Vos, C. H. R., & Schat, H. (1991). Free radicals and heavy metal tolerance. In *Ecological responses to environmental stresses*. edited by Rozema, J., & Verkleij, J. A. C.. Dordrecht: Springer. 22-31.

Dhindsa, R. S., Plumb-Dhindsa, P. A. M. E. L. A., & Thorpe, T. A. (1981). Leaf senescence: correlated with increased levels of membrane permeability and lipid peroxidation, and decreased levels of superoxide dismutase and catalase. *Journal of Experimental Botany*, *32*(1), 93-101.

Ellouzi, H., Ben Hamed, K., Hernández, I., Cela, J., Müller, M., Magné, C., Abdelly, C., & Munné-Bosch, S. (2014). A comparative study of the early osmotic, ionic, redox and hormonal signaling response in leaves and roots of two halophytes and a glycophyte to salinity. *Planta*, *240*(6), 1299-1317. https://doi.org/10.1007/s00425-014-2154-7

Ghadami, A., Raeni, M., Shahnazari, A., & Zare abyane, H. (2014). Variation of Chlorophyll, Leaf Area Index and Root Parameters of Sunflower Under, Regulated Deficit and Partial Root Zone Drying Irrigation. *Plant Production Technology 6*(1), 69-79. (In Persian)

Ghassemi-Golezani, K., Bilasvar, H. M., & Nassab, A. D. M. (2019). Improving rapeseed (*Brassica napus* L.) plant performance by exogenous salicylic acid and putrescine under gradual water deficit. *Acta physiologiae plantarum*, *41*(12), 1-8.

Hamedani, N. G., Gholamhoseini, M., Bazrafshan, F., Amiri, B., & Habibzadeh, F. (2020). Variability of root traits in sesame genotypes under different irrigation regimes. *Rhizosphere*, *13*, 100190.

Harrathi, J., Hosni, K., Karray-Bouraoui, N., Attia, H., Marzouk, B., Magné, C., & Lachaâl, M. (2012). Effect of salt stress on growth, fatty acids and essential oils in safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Acta Physiologiae Plantarum*, *34*(1), 129-137.

Hussain, M. I., Lyra, D. A., Farooq, M., Nikoloudakis, N., & Khalid, N. (2016). Salt and drought stresses in safflower: a review. *Agronomy for sustainable development*, *36*(1), 1-31.

Imtiaz, M., Tu, S., Xie, Z., Han, D., Ashraf, M., & Rizwan, M. S. (2015). Growth, V uptake, and antioxidant enzymes responses of chickpea (*Cicer arietinum* L.) genotypes under vanadium stress. *Plant and Soil*, *390*, 17-27.

Jiang, Y., & Huang, B. (2001). Osmotic adjustment and root growth associated with drought preconditioning-enhanced heat tolerance in Kentucky bluegrass. *Crop Science*, *41*(4), 1168-1173.

Joshan, Y., Sani, B., Jabbari, H., Mozafari, H., & Moaveni, P. (2019). Effect of drought stress on oil content and fatty acids composition of some safflower genotypes. *Plant, Soil and Environment*, *65*(11), 563-567.

Kapoor, D., Bhardwaj, S., Landi, M., Sharma, A., Ramakrishnan, M., & Sharma, A. (2020). The impact of drought in plant metabolism: How to exploit tolerance mechanisms to increase crop production. *Applied Sciences*, *10*(16), 56-92.

Kar, M., & Mishra, D. (1976). Catalase, peroxidase, and polyphenoloxidase activities during rice leaf senescence. *Plant physiology*, *57*(2), 315-319.

Karimizadeh, R., & Mohammadi, M. (2011). Association of canopy temperature depression with yield of durum wheat genotypes under supplementary irrigated and rainfed conditions. *Australian Journal of Crop Science*, *5*(2), 138-146.

Kavi Kishor, P. B., Hima Kumari, P., Sunita, M. S. L., & Sreenivasulu, N. (2015). Role of proline in cell wall synthesis and plant development and its implications in plant ontogeny. *Frontiers in Plant Science*, *6*, 544.

Khalatbari, A., Shirani Rad, A., Valadabady, S. A., Sayfzadeh, S., & Zakerin, H. (2022). Yield Components and Fatty Acids Variation of Canola Cultivars under Different Irrigation Regimes and Planting Dates. *Gesunde Pflanzen*, *74*(1), 17-27.

Khalili, M., & Naghavi, M, (2018). Evaluation of physiological and protein response of tolerant and susceptible wheat cultivars to different concentration of drought stresses. *Modern Genetic Journal*, *13*(1), 103-118. (In Persian)

Kreps, F., Kyselka, J., Burčová, Z., Schmidt, Š., Rajchl, A., Filip, V., Ház, A., Jablonský, M., Sládková, A., & Šurina, I. (2017). Influence of deodorization temperature on formation of tocopherol esters and fatty acids polymers in vegetable oil. *European Journal of Lipid Science and Technology*, *119*(3), 1600027. https://doi.org/10.1002/ejlt.201600027

Lambert, A. J., & Brand, M. D. (2009). Reactive oxygen species production by mitochondria. *Methods in molecular biology*, *554*, 165-181. https://doi.org/10.1007/978-1-59745-521-3_11

Leach, K. A., Hejlek, L. G., Hearne, L. B., Nguyen, H. T., Sharp, R. E., & Davis, G. L. (2011). Primary root elongation rate and abscisic acid levels of maize in response to water stress. *Crop Science*, *51*(1), 157-172.

Nasirzadeh, L., Sorkhilaleloo, B., Majidi Hervan, E., & Fatehi, F. (2021). Changes in antioxidant enzyme activities and gene expression profiles under drought stress in tolerant, intermediate, and susceptible wheat genotypes. *Cereal Research Communications*, *49*, 83-89.

Nazari, M., Mirlohi, A., & Majidi, M. M. (2017). Effects of drought stress on oil characteristics of *Carthamus* species. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, *94*(2), 247-256.

Pasban Eslam, B. (2011a). Drought Stress Effects on Productivity of Fall Safflower Genotypes. *Iranian Journal of Field Crop Science*, *42*(2), 275-283. (In Persian)

Pasban Eslam, B. (2011b). Evaluation of physiological indices for improving water deficit tolerance in spring safflower. *Journal of Agriculture Science and Technology*, *13*, 327-338.

Pasban Eslam, B., Sadeghi Bakhtevari, A. R., Jabbari, H., & Bybordi, A. (2021). Physiological and agronomic response of promise safflower genotypes to late season water deficit stress. *Iranian Journal of Field Crop Science*, *52*(1), 123-130. (In Persian)

Polania, J., Rao, I. M., Cajiao, C., Grajales, M., Rivera, M., Velasquez, F., Raatz, B., & Beebe, S. E. (2017). Shoot and Root Traits Contribute to Drought Resistance in Recombinant Inbred Lines of MD 23-24 × SEA 5 of Common Bean. *Frontiers in Plant Science*, *8*, 246466.

Rahmani, F., Sayfzadeh, S., Jabbari, H., Valadabadi, S. A., & Hadidi Masouleh, E. (2019). Alleviation of drought stress effects on safflower yield by foliar application of zinc. *International Journal of Plant Production*, *13*(4), 297-308.

Reiahisamani, N., Esmaeili, M., Khoshkholgh Sima, N. A., Zaefarian, F., & Zeinalabedini, M. (2018). Assessment of the oil content of the seed produced by Salicornia L., along with its ability to produce forage in saline soils. *Genetic Resources and Crop Evolution*, *65*(7), 1879-1891.

Spasibionek, S., Mikołajczyk, K., Ćwiek-Kupczyńska, H., Piętka, T., Krótka, K., Matuszczak, M., Nowakowska, J., Michalski, K., & Bartkowiak-Broda, I. (2020). Marker assisted selection of new high oleic and low linolenic winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) inbred lines revealing good agricultural value. *PloS one*, *15*(6), e0233959. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0233959

Shakeel, A. A., Xiao-yu, X., Long-chang, W., Muhammad, F. S., Chen, M., & Wang, L. (2011). Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. *African journal of agricultural research*, *6*(9), 2026-2032.

Shir esmaeili, G. H., Maghsudi mood, A. A., Khajueinejad, G. R., & Abdoshahi, R. (2018). Yield and Oil Percentage of Safflower Cultivars (*Carthamus tinctorius* L.) in Spring and Summer Planting Seasons Affected by Drought Stress. *Journal of Crop Ecophysiology*, *12*(46(2)), 237-252. (In Persian)

Suriya-arunroj, D., Supapoj, N., Toojinda, T., & Vanavichit, A. (2004). Relative leaf water content as an efficient method for evaluating rice cultivars for tolerance to salt stress. *Science Asia*, *30*, 411-415.

Udawat, P., Jha, R. K., Mishra, A., & Jha, B. (2017). Overexpression of a Plasma Membrane-Localized SbSRP-Like Protein Enhances Salinity and Osmotic Stress Tolerance in Transgenic Tobacco. *Frontiers in Plant Science*, *8*, 230803. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00582

Yari, P. & Keshtkar, A. H. (2015). Correlation between Traits and Path Analysis of Safflower Grain Yield under Water Stress Conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research*, *14*(3), 427-437. (In Persian)

Yeloojeh, K. A., Saeidi, G., & Sabzalian, M. R. (2020). Drought stress improves the composition of secondary metabolites in safflower flower at the expense of reduction in seed yield and oil content. *Industrial Crops and Products*, *154*, 112496.