

واکنش محتوای عناصر و صفات فیزیولوژیک به تنش شوری و خشکی و گزینش ژنوتیپ در گلرنگ (*Carthamus tinctorius*)

مینا امیری، محمدمهدی مجیدی* و قدرت‌الله سعیدی

گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۳، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۰۴/۱۷)

چکیده

تنش‌های غیرزیستی از جمله تنش‌های شوری و خشکی نقش بسیار مهمی در کاهش عملکرد گیاهان دارند. صفات فیزیولوژیک نسبت به صفات مورفولوژیک و زراعی توانایی بیشتری در شناسایی و تفکیک پاسخ گیاه به شرایط تنش دارند و می‌توانند به عنوان شاخص‌های مؤثرتری در غربالگری ژنوتیپ‌های متحمل به تنش مورد استفاده قرار گیرند. از تلاقی بین گونه‌ای می‌توان به منظور افزایش تنوع ژنتیکی، انتقال سازگاری و افزایش تحمل به تنش‌های شوری و خشکی و ایجاد ارقام جدید استفاده کرد. در این مطالعه ۱۰ ژنوتیپ شامل چهار لاین خالص نوترکیب (RIL) که حاصل از تلاقی دو گونه *Carthamus tinctorius* با *C. palaestinus* و *C. oxyacanthus* (با کد TP و TO) بودند، گونه والدینی *C. tinctorius*، دو رقم رایج داخلی کشور (رقم‌های کوسه و پدیده) و سه ژنوتیپ منتخب حاصل از مطالعات قبلی، در سه محیط شامل خشکی (۹۰ درصد تخلیه رطوبتی)، نرمال (۵۰ درصد تخلیه رطوبتی) و شوری ($EC=20 \text{ dSm}^{-1}$) ارزیابی شدند. نتایج نشان داد تنوع بالایی بین ژنوتیپ‌های مورد مطالعه از لحاظ کلیه صفات و تحمل به تنش شوری و خشکی وجود دارد. تنش خشکی و شوری باعث کاهش عملکرد (به ترتیب ۳۴ و ۵۴ درصد) و محتوای نسبی آب برگ (به ترتیب ۳۲ و ۴۰ درصد) و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (آسکوربات پراکسیداز، پراکسیداز و کاتالاز) شد. ضرایب همبستگی نشان داد رابطه مثبت و معنی‌داری بین محتوای نسبی آب برگ و عملکرد دانه در ارقام مورد بررسی وجود داشت. در شرایط تنش شوری مقدار سدیم با فعالیت آنزیم آسکوربات و همچنین عملکرد دانه با شاخص تحمل دارای همبستگی مثبت و معنی‌داری بودند. با توجه به افزایش بیشتر فعالیت آنزیمی در اثر تنش شوری و کمتر بودن تغییر محتوای نسبی آب برگ در اثر این تنش در مقایسه با تنش خشکی و به دنبال آن کاهش بیشتر عملکرد دانه در اثر تنش خشکی، می‌توان نتیجه گرفت که ژنوتیپ‌های مورد مطالعه در مقابل تنش شوری تحمل بیشتری نسبت به تنش خشکی نشان داده‌اند. ژنوتیپ‌های متحمل به هر دو شرایط تنش خشکی و شوری شناسایی شدند به طوری که می‌توان ژنوتیپ 61TP (حاصل از تلاقی بین گونه‌ای) را به عنوان ژنوتیپ متحمل به شوری، ژنوتیپ G59 (منتخب جهانی) را متحمل به خشکی و ژنوتیپ G47 (منتخب جهانی) و رقم تجاری پدیده را حساس به شرایط تنش معرفی کرد. از ژنوتیپ‌های شناسایی شده می‌توان برای آزادسازی ارقام جدید یا تلاقی و استفاده در مطالعات آتی استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: آسکوربات پراکسیداز، گلرنگ، کم آبی، محتوای نسبی آب برگ

مقدمه

گیاه دانه روغنی و دارویی گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.) یکی از گیاهان بومی کشور است که وجود انواع گونه‌های وحشی آن در سراسر کشور نشان از سازگاری این گیاه با شرایط بومی ایران دارد. تحمل نسبی گلرنگ به شوری و خشکی و همچنین دارا بودن روغنی با کیفیت بالا (حتی در حد روغن زیتون در برخی از ژنوتیپ‌ها) از مشخصات بارز این گیاه است (ابوالحسنی و سعیدی، ۱۳۸۵). جنس *Carthamus* شامل ۱۵ گونه است که *C. tinctorius* تنها گونه زراعی آن می‌باشد. بیشتر گونه‌های موجود در این جنس دیپلوئید ($2n=2x=24$) هستند (Vilatersana et al., 2005). گونه زراعی عموماً یکساله است و برخی گونه‌های وحشی آن دو یا چند ساله هستند (امیدی و همکاران، ۱۳۹۳). تنوع ژنتیکی در گونه زراعی گلرنگ بدلیل انتخاب طبیعی (در طی اهلی شدن) و مصنوعی (توسط اصلاحگران) کاهش یافته و استفاده از منابع ژنی بیگانه و بهره‌گیری از خصوصیات مطلوب گونه‌های وحشی به ویژه در شرایط تغییر اقلیم اجتناب‌ناپذیر شده است (Espanani et al., 2019).

یکی از مسائلی که صنعت کشاورزی با آن روبرو شده است، مشکل خشکسالی و شوری آب و خاک است که در کشور ما نیز با توجه به تغییرات اقلیمی این موضوع بسیار حائز اهمیت است. تنش‌های غیرزیستی مانند کم آبی، شوری، تغییرات دمایی و آلودگی‌های محیطی باعث کاهش فتوسنتز، کارایی مصرف آب، جذب مواد مغذی و رشد کلی گیاهان می‌شوند. این تنش‌ها تولید رادیکال‌های آزاد و گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) را افزایش می‌دهند که منجر به آسیب‌های اکسیداتیو در سلول‌های گیاهی می‌شود. در شرایط تنش، تجمع یون‌های سمی مانند سدیم در گیاه افزایش می‌یابد که موجب اختلال در متابولیسم طبیعی و کاهش عملکرد محصول می‌شود (Cao et al., 2025). گیاهان برای مقابله با این تنش اکسیداتیو، سامانه‌های آنتی‌اکسیدانی آنزیمی و غیرآنزیمی را فعال می‌کنند. آنزیم‌هایی مانند سوپراکسید دیسموتاز (SOD)، کاتالاز (CAT) و آسکوربات پراکسیداز (APX) در خنثی‌سازی ROS نقش

مهمی دارند (Haghpanah et al., 2024). استفاده از تنظیمات اسمزی و آنتی‌اکسیدان‌ها در گیاه می‌تواند راهکاری مؤثر برای کاهش آسیب‌های ناشی از تنش‌های خشکی و شوری باشد (Haghpanah et al., 2024; Onder et al., 2022). آثار تنش خشکی و شوری در ایجاد تنش اسمزی مشترک هستند، بدین ترتیب که در شوری‌های ملایم کوتاه مدت و یا شوری اندک، تنش اسمزی اتفاق می‌افتد که ناشی از غلظت بالای یون‌های موجود در محلول خاک (خارج از ریشه) است و موجب پایین آوردن پتانسیل آب خاک می‌شود و در نتیجه جذب آب توسط گیاه را دشوار می‌سازد. با این وجود در تنش شوری شدید و یا ملایم طولانی مدت، به لحاظ تجمع یون‌های سمی (سدیم و کلر)، تنش سمیت یونی غالب است، که موجب صدمه به متابولیت‌های سلولی از جمله پروتئین‌ها، آنزیم‌ها، DNA و RNA و همین‌طور غشا پلاسمایی سلول می‌گردد (Arzani and Ashraf, 2016). آنزیم‌های CAT و APX نقش کلیدی در افزایش تحمل به شوری در گلرنگ دارند به‌طوری‌که فعالیت بالای CAT و APX می‌تواند به عنوان معیاری برای انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل به شوری استفاده شود (Onder et al., 2022).

یکی از راهکارهای مهم برای مقابله با تنش‌های شوری و خشکی، مطالعه تنوع و سازگاری اکوتیپ‌ها و ارقام مختلف داخلی و خارجی و اصلاح گیاهان برای تحمل به تنش است، تا بتوان ژنوتیپ‌های جدید و متحمل‌تر را جایگزین ارقام حساس کرد (ملکی‌نژاد و مجیدی، ۱۳۹۴). بنابراین جمع‌آوری و ارزیابی ژرم‌پلاسما اولین قدم در راه به‌نژادی گیاهان است. نتایج حاصل از مطالعه ابراهیمی و همکاران (۲۰۱۶) که به منظور بررسی پایداری تولید یک کلکسیون جهانی گلرنگ و تجزیه ژنتیکی صفات مختلف تحت شرایط رطوبتی عادی و تنش خشکی در سه منطقه اصفهان، جیرفت و کرمان انجام شده است و نتایج آن‌ها نشان داد که ارقام خارجی عملکرد و تحمل به تنش خشکی بیشتری را نشان دادند. ارقام ایرانی از محتوای روغن دانه بیشتری نسبت به ارقام خارجی برخوردار بودند (Ebrahimi et al., 2016). راهکار مهم دیگر برای مقابله با

نش های شوری و خشکی وارد کردن اجداد وحشی گیاهان را تلاقی است. مطالعه اسپنانی (۲۰۱۹) به منظور بررسی اثر تنش خشکی بر ویژگی های مرفولوژیک، زراعی و فیزیولوژیک در سه جمعیت حاصل از سه تلاقی بین گونه ای نشان داد که برای صفات مورد بررسی بین و درون جمعیت ها تنوع ژنتیکی قابل توجه وجود دارد. در ضمن در مطالعه آن ها، تنوع ایجاد شده در هر جمعیت در نسل F5 نسبت به نسل F3 و F4 در هر دو شرایط نرمال و تنش خشکی افزایش یافته که نشان می دهد تلاقی بین گونه ای برای ایجاد تنوع موفقیت آمیز بوده است (Espanani et al., 2019).

متأسفانه در بسیاری از گیاهان زراعی از جمله گلرنگ، بخش اعظم تنوع ژنتیکی (به ویژه برای تحمل به تنش های زیستی و غیرزیستی) که از اجداد آن ها به ارث رسیده، در اثر پدیده تنگنای ژنتیکی (Genetic bottleneck) از دست رفته است. از این رو بهره گیری از تلاقی های بین گونه ای برای ایجاد تنوع جدید و بیشتر در دستور کار به نژادگران قرار گرفته است. یکی از راه های افزایش سریع تنوع ژنتیکی دورگ گیری بین گونه های خویشاوند نزدیک است. والدینی که از لحاظ ژنتیکی متفاوت تر هستند، معمولاً هیبریدهایی با هتروزیس بیشتر تولید می کنند و احتمال به دست آوردن نتایج تفرق یافته برتر را افزایش می دهند (Espanani et al., 2019). خویشاوندان وحشی گیاهان زراعی به صورت انکارناپذیری در غنای خزانه ژنی برای به نژادگران در کشاورزی مدرن بسیار مفید هستند (Shafiei-Koij et al., 2019). از گونه های وحشی گلرنگ به دلیل اهمیت ژن های موجود در آنها می توان برای بهبود صفات مطلوب در گونه های زراعی استفاده کرد (Estilai and Knowles, 1976). مطالعات مولکولی تأیید کرده اند که دو گونه *C. palaestinus* و *C. oxyacanthus* اجداد وحشی گلرنگ زراعی هستند (Sehgal et al., 2008). از مهم ترین تلاقی های بین گونه ای در این جنس می توان به تلاقی بین *C. tinctorius* و *C. oxyacanthus* توسط Deshpande (۱۹۵۲)، تلاقی بین *C. tinctorius*، *C. oxyacanthus* و *C. palaestinus* توسط Ashri و Knowles (۱۹۶۰) و همکاران (۱۹۷۵) اشاره

نمود. در ایران گونه های اهلی و وحشی مختلف گلرنگ را تلاقی دادند و هیبریدهای حاصل با استفاده از صفات مرفولوژیک و نشانگر مولکولی SRAP و ISSR تأیید شدند (Amini et al., 2008; Majidi and Zadhoush, 2014). همچنین تلاقی پذیری بالایی را بین گونه اهلی گلرنگ (*C. tinctorius*) با دو گونه وحشی *C. palaestinus* و *C. oxyacanthus* مشاهده کردند (شیراوند و مجیدی، ۱۳۹۳، ۱۳۹۲). Majidi و همکاران (۲۰۱۱) طی مطالعاتی نشان دادند که گونه وحشی *C. oxyacanthus* در شرایط تنش می تواند عملکرد بهتری نسبت به گونه های دیگر گلرنگ داشته باشد (شیراوند و مجیدی، ۱۳۹۲). اسپنانی و همکاران (۲۰۱۹) طی تحقیقات خود نشان دادند کارایی انتخاب در جمعیت حاصل از تلاقی *C. tinctorius* × *C. palaestinus* بیشتر از جمعیت حاصل از تلاقی *C. tinctorius* × *C. oxyacanthus* است و می توان از این جمعیت برای تولید ژنوتیپ های با عملکرد بیشتر در برنامه های اصلاحی بهره برد (Espanani et al., 2019). همچنین Majidi و همکاران (۲۰۱۱) گزارش کردند از آنجا که والد وحشی *C. palaestinus* دارای صفات نامطلوب کمتری است، می توان نسبت به انتقال ژن های مطلوب آن به گونه زراعی گلرنگ در برنامه های به نژادی اقدام کرد. مطالعه زارعی (۱۴۰۰) نشان داد که در کشت پاییزه گلرنگ با اعمال تنش شوری با سطح نهایی ۱۲ دسی زیمنس بر متر، تنوع ژنتیکی بالایی بین لاین های نوترکیب برای تحمل به تنش شوری و صفات زراعی و مرفولوژیک در نسل F8 وجود دارد. همچنین مطالعه منصوری (۱۴۰۱) در کشت بهاره گلرنگ، نتایج مشابهی را با مطالعه زارعی (۱۴۰۰) در ارتباط با وجود تنوع ژنتیکی بالا بین لاین های نوترکیب برای تحمل به تنش شوری و صفات مرفولوژیک در نسل F9 نشان داد.

برنامه به نژادی گلرنگ از طریق تلاقی بین گونه ای از سال ۱۳۹۰ در دانشگاه صنعتی اصفهان آغاز و لاین های خالص نوترکیب نسل دهم فراهم شد که در کنار ارقام گونه زراعی (داخلی و خارجی) در برنامه های تحقیقاتی این گیاه مورد استفاده قرار گرفت. در مطالعات قبلی (زارعی، ۱۴۰۰؛

متأسفانه در بسیاری از گیاهان زراعی از جمله گلرنگ، بخش اعظم تنوع ژنتیکی (به ویژه برای تحمل به تنش های زیستی و غیرزیستی) که از اجداد آن ها به ارث رسیده، در اثر پدیده تنگنای ژنتیکی (Genetic bottleneck) از دست رفته است. از این رو بهره گیری از تلاقی های بین گونه ای برای ایجاد تنوع جدید و بیشتر در دستور کار به نژادگران قرار گرفته است. یکی از راه های افزایش سریع تنوع ژنتیکی دورگ گیری بین گونه های خویشاوند نزدیک است. والدینی که از لحاظ ژنتیکی متفاوت تر هستند، معمولاً هیبریدهایی با هتروزیس بیشتر تولید می کنند و احتمال به دست آوردن نتایج تفرق یافته برتر را افزایش می دهند (Espanani et al., 2019). خویشاوندان وحشی گیاهان زراعی به صورت انکارناپذیری در غنای خزانه ژنی برای به نژادگران در کشاورزی مدرن بسیار مفید هستند (Shafiei-Koij et al., 2019). از گونه های وحشی گلرنگ به دلیل اهمیت ژن های موجود در آنها می توان برای بهبود صفات مطلوب در گونه های زراعی استفاده کرد (Estilai and Knowles, 1976). مطالعات مولکولی تأیید کرده اند که دو گونه *C. palaestinus* و *C. oxyacanthus* اجداد وحشی گلرنگ زراعی هستند (Sehgal et al., 2008). از مهم ترین تلاقی های بین گونه ای در این جنس می توان به تلاقی بین *C. tinctorius* و *C. oxyacanthus* توسط Deshpande (۱۹۵۲)، تلاقی بین *C. tinctorius*، *C. oxyacanthus* و *C. palaestinus* توسط Ashri و Knowles (۱۹۶۰) و همکاران (۱۹۷۵) اشاره

متأسفانه در بسیاری از گیاهان زراعی از جمله گلرنگ، بخش اعظم تنوع ژنتیکی (به ویژه برای تحمل به تنش های زیستی و غیرزیستی) که از اجداد آن ها به ارث رسیده، در اثر پدیده تنگنای ژنتیکی (Genetic bottleneck) از دست رفته است. از این رو بهره گیری از تلاقی های بین گونه ای برای ایجاد تنوع جدید و بیشتر در دستور کار به نژادگران قرار گرفته است. یکی از راه های افزایش سریع تنوع ژنتیکی دورگ گیری بین گونه های خویشاوند نزدیک است. والدینی که از لحاظ ژنتیکی متفاوت تر هستند، معمولاً هیبریدهایی با هتروزیس بیشتر تولید می کنند و احتمال به دست آوردن نتایج تفرق یافته برتر را افزایش می دهند (Espanani et al., 2019). خویشاوندان وحشی گیاهان زراعی به صورت انکارناپذیری در غنای خزانه ژنی برای به نژادگران در کشاورزی مدرن بسیار مفید هستند (Shafiei-Koij et al., 2019). از گونه های وحشی گلرنگ به دلیل اهمیت ژن های موجود در آنها می توان برای بهبود صفات مطلوب در گونه های زراعی استفاده کرد (Estilai and Knowles, 1976). مطالعات مولکولی تأیید کرده اند که دو گونه *C. palaestinus* و *C. oxyacanthus* اجداد وحشی گلرنگ زراعی هستند (Sehgal et al., 2008). از مهم ترین تلاقی های بین گونه ای در این جنس می توان به تلاقی بین *C. tinctorius* و *C. oxyacanthus* توسط Deshpande (۱۹۵۲)، تلاقی بین *C. tinctorius*، *C. oxyacanthus* و *C. palaestinus* توسط Ashri و Knowles (۱۹۶۰) و همکاران (۱۹۷۵) اشاره

خطکشت ۲ متری با ۵۰ سانتی‌متر فاصله بین واحدهای آزمایشی در نظر گرفته شد. فاصله‌ی بوته‌ها روی هر خط کشت ۲۰ سانتی‌متر و سیستم آبیاری به صورت قطره‌ای بود. اعمال هر دو تنش خشکی و شوری قبل از مرحله تکمه‌دهی گیاه انجام گرفت و تا این زمان آبیاری به طور یکسان برای همه تیمارها و به صورت قطره‌ای انجام شد. برای تعیین زمان آبیاری، رطوبت خاک به صورت دستی یا با دستگاه رطوبت‌سنج TDR (شرکت آذر خاک آب ارومیه) و تأیید مقدار تجمعی ET، به صورت روزانه پایش شد. آبیاری تیمار نرمال در زمان ۵۰ درصد تخلیه رطوبتی از حد زراعی مزرعه ($MAD, Maximum Allowable Depletion = 50\%$) و آبیاری تیمار تنش خشکی در زمان ۹۰ درصد تخلیه رطوبتی از حد زراعی مزرعه ($MAD = 90\%$) انجام گرفت. برای تعیین میزان آب مورد نیاز هر کرت ابتدا عمق آبیاری از فرمول زیر محاسبه شد.

$$I = (\theta_{FC} - \theta_{irri}) \times B \times D$$

در فرمول بالا، B: چگالی ظاهری خاک (۱/۴)، D: عمق توسعه ریشه (۶۰ سانتی‌متر)، FC: رطوبت وزنی خاک در حد ظرفیت زراعی، θ_{irri} : متوسط رطوبت وزنی در عمق توسعه ریشه مربوط به زمان آبیاری است (برای تیمار نرمال در زمان ۵۰ درصد تخلیه رطوبتی و برای تیمار تنش خشکی در زمان ۹۰ درصد تخلیه رطوبتی). سپس حجم آبیاری بر حسب لیتر از فرمول $V = I \times A$ بدست آمد که A مساحت کرت بر حسب متر مربع و I عمق آبیاری بر حسب میلی‌متر است. برای اندازه‌گیری میزان آب ورودی کرت‌ها از کنتور استفاده شد.

تیمار نهایی تنش شوری در این مطالعه در سطح ۲۰۰ میلی‌مولار (معادل $EC=20 \text{ dSm}^{-1}$) بر اساس تجربه و مطالعات قبلی اعمال شد. زمان اعمال تیمار شوری هم زمان با تیمار شاهد (نرمال) بود، ولی آبیاری با آب شور (نمک طعام) انجام شد و در صورت لزوم نیز در آبیاری‌های بعدی ضریب کسر آبشویی اعمال گردید.

صفات مورد اندازه‌گیری: محتوای نسبی آب برگ با استفاده از برگ‌های بالغ و جوان قسمت بالای ساقه گیاه در

منصوری، ۱۴۰۱؛ Espanani et al., 2019; Ebrahimi et al., 2016) از بین ارقام مورد مطالعه تعدادی ژنوتیپ متحمل به تنش شوری و همچنین تعدادی ژنوتیپ متحمل به تنش خشکی شناسایی شدند. با این حال ارزیابی تکمیلی بهترین و متحمل‌ترین لاین‌های حاصل از تلاقی بین‌گونه‌ای و ژرم‌پلاسم زراعی گلرنگ (داخلی و خارجی) تحت تنش شوری و تنش خشکی از نظر صفات فیزیولوژیک در مزرعه انجام نشده است. هدف از این پژوهش مطالعه واکنش ژنوتیپ‌ها، ارزیابی تنوع ژنتیکی و انتخاب بهترین و متحمل‌ترین ژنوتیپ‌های گزینش یافته از ژرم‌پلاسم خارجی و داخلی و لاین‌های حاصل از سه تلاقی بین‌گونه‌ای گلرنگ در شرایط نرمال، تنش شوری و خشکی با توجه به صفات فیزیولوژیک و نیز تحلیل ارتباط بین متغیرها به منظور یافتن شاخص‌های مناسب برای گزینش سریع‌تر ژنوتیپ‌ها است.

مواد و روش‌ها

مواد ژنتیکی و نحوه اعمال تیمارهای تنش: مواد ژنتیکی این مطالعه شامل تعداد ۱۰ ژنوتیپ منتخب که شامل چهار لاین خالص نوترکیب نسل F10 حاصل از تلاقی بین‌گونه‌ای دو گونه *C. tinctorius* با *C. palaestinus*، *C. oxyacanthus* (دو جمعیت حاصل از تلاقی بین گونه‌ای TP و TO) به همراه گونه والدینی *C. tinctorius* و همچنین دو رقم رایج داخلی کشور (رقم‌های کوسه و پدیده) و سه ژنوتیپ منتخب جهانی و پایدار حاصل از مطالعات قبلی (زارعی، ۱۴۰۰؛ منصوری، ۱۴۰۱؛ Espanani et al., 2019; Ebrahimi et al., 2016) بود که در مزرعه پژوهشی دانشگاه صنعتی اصفهان در سه محیط جداگانه (نرمال، تنش شوری و تنش خشکی) در قالب طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی با سه تکرار در سال ۱۴۰۲ ارزیابی شدند. ژنوتیپ‌های خارجی اولیه از بانک‌های ژن گیاهی آلمان و آمریکا تأمین شدند و ژنوتیپ‌های داخلی نیز از ژنوتیپ‌های موجود در پروژه گلرنگ گروه تولید و ژنتیک گیاهی دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان بودند. کشت در روز ۱۰ آذر سال ۱۴۰۱ انجام شد. هر واحد آزمایشی به صورت دو

پراکسیداز ۳ میلی لیتر بافر فسفات، ۴/۵۱ میکرو لیتر H_2O_2 و ۳/۳۵ میکرو لیتر از ماده گایاکول درون کوت اضافه شد و از این سه ماده به عنوان بلانک برای صفر نمودن دستگاه اسپکتروفتومتر استفاده شد. سپس ۵۰ میکرو لیتر عصاره استخراج شده به آن اضافه و در طول موج ۴۷۰ نانومتر به مدت دو دقیقه و هر ۳۰ ثانیه یک عدد یادداشت برداری شد (Chance and Maehly, 1955).

برای اندازه گیری فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز ۳ میلی لیتر بافر فسفات، ۴/۵۱ میکرو لیتر H_2O_2 و ۱۰۰ میکرو لیتر محلول آسکوربات آماده شده به درون کوت اضافه شد. این سه ماده به عنوان بلانک این آنزیم بوده و پس از صفر کردن دستگاه اسپکتروفتومتر، ۵۰ میکرو لیتر عصاره نمونه درون کوت افزوده شد. سپس این آنزیم در طول موج ۲۹۰ نانومتر خوانده و مانند آنزیم قبلی در هر ۳۰ ثانیه طی مدت دو دقیقه یک عدد ثبت شد (Nakano and Asada, 1981).

برای اندازه گیری محتوای پروتئین از روش Bradford (۱۹۷۶) استفاده شد. مقدار ۱۰۰ میکرو لیتر از عصاره نمونه به ۳۰۰۰ میکرو لیتر محلول بردفورد اضافه و سپس به مدت ۳۰ دقیقه در محیط تاریک قرار داده شد. سپس در طول موج ۵۹۵ نانومتر خوانده پروتئین انجام گردید و از محلول بردفورد نیز به عنوان استاندارد برای صفر نمودن دستگاه اسپکتروفتومتر استفاده شد. در نهایت با استفاده از منحنی استاندارد و محتوای پروتئین اندازه گیری شده میزان فعالیت آنزیم ها محاسبه شد.

پس از رسیدگی بوته ها در تاریخ ۱۵ مرداد ۱۴۰۲، ۱۰ بوته از واحد آزمایشی به صورت تصادفی انتخاب و با رعایت حاشیه، برداشت و بوجاری متوسط عملکرد دانه در بوته محاسبه شد. به منظور برآورد میزان تحمل ژنوتیپ های گلرنگ نسبت به دو تنش شوری و خشکی، از شاخص های تحمل به تنش و پایداری استفاده شد. شاخص پایداری عملکرد YSI (Yield Stability Index) به کمک معادله زیر محاسبه شد که در آن Y_p و Y_s به ترتیب عملکرد هر ژنوتیپ در شرایط بدون تنش و تنش هستند (Bousslama and Schapaguh, 1984).

$$YSI = \frac{Y_s}{Y_p}$$

مرحله گلدهی و حدود یک ماه پس از اعمال تنش اندازه گیری شد. برای این منظور ابتدا وزن تازه (FW) نمونه برگ ها تعیین و سپس آن ها را در آب مقطر به مدت ۲۴ ساعت در دمای آزمایشگاه و تاریکی قرار داده و وزن برگ ها در حالت آماس (TW) تعیین شد. در مرحله بعد، برگ ها به مدت ۷۲ ساعت در آون قرار داده و وزن خشک (DW) آن ها اندازه گیری و در نهایت RWC با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد (Gao, 2006):

$$\%RWC = [(FW-DW)/(TW-DW)] \times 100$$

برای اندازه گیری غلظت یون های سدیم و پتاسیم، مقدار ۰/۲ گرم برگ خشک (در آون) در کوره الکتریکی به خاکستر تبدیل شد. ۱۰ میلی لیتر اسید کلریدریک ۲ نرمال به نمونه های خاکستر شده اضافه و با حرارت ملایم روی هیتر (Heater)، در اسید حل شدند. محلول تهیه شده از قیف و کاغذ صافی عبور داده شد و در نهایت با آب مقطر، حجم عصاره نهایی به ۱۰۰ میلی لیتر رسانده شد. برای اندازه گیری سدیم و پتاسیم از دستگاه شعله سنج (Flame photometer) استفاده شد، و سپس براساس منحنی های استاندارد رسم شده غلظت سدیم و پتاسیم در نمونه ها تعیین گردید (Leo, 1971).

برای اندازه گیری فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدان، ۰/۱ گرم برگ تازه توسط نیتروژن مایع پودر شده و درون میکروتیوپ اتوکلاو شده ریخته شد و سپس ۱۰۰۰ میکرو لیتر بافر استخراج که از قبل تهیه شده بود به آن اضافه گردید. سپس به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۴ درجه سلسیوس با دور ۱۲۰۰۰ rpm ساتریفیوژ شد. از عصاره حاصل برای اندازه گیری میزان فعالیت آنزیم های زیر استفاده شد:

برای اندازه گیری فعالیت آنزیم کاتالاز ۳ میلی لیتر بافر فسفات درون کوت ریخته و به آن ۴/۵۱ میکرو لیتر H_2O_2 اضافه شد. دستگاه اسپکتروفتومتر توسط این محلول (به عنوان بلانک) صفر شد. سپس ۵۰ میکرو لیتر از عصاره نمونه به محلول اضافه شد و آنزیم کاتالاز در طول موج ۲۴۰ نانومتر خوانده شد. برای هر نمونه در طی مدت دو دقیقه هر ۳۰ ثانیه یکبار عدد اسپکت یادداشت شد (Aebi, 1984). برای اندازه گیری فعالیت آنزیم

برهمکنش، واکنش ژنوتیپ‌ها به محیط‌های تنش از لحاظ بروز این صفات متفاوت بود.

دامنه تغییرات صفات و مقایسه میانگین ژنوتیپ‌ها: دامنه تغییرات، میانگین و درصد تغییر صفات در اثر تنش شوری و خشکی برای صفات فیزیولوژیک و عملکرد دانه در جدول ۳ آورده شده است. شوری اثر افزایشی معنی‌داری بر صفات مقدار عنصر سدیم و نسبت میزان سدیم به پتاسیم داشت، درحالی‌که میزان پتاسیم در اثر تنش شوری به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. مقدار عنصر سدیم تحت تنش شوری ۶۲/۰۴ درصد افزایش پیدا کرد. بسیاری از مقالات و گزارش‌ها، افزایش معنی‌داری در محتوی عنصر سدیم در برگ گیاه را تحت تنش شوری ثبت کرده‌اند. از جمله این پژوهش‌ها می‌توان به پژوهش فتاحیان Fatahiyan و همکاران (۲۰۲۵) روی گیاه گلرنگ، Ebrahim و همکاران (۲۰۱۹) روی گیاه جو وحشی و Kiani و همکاران (۲۰۱۵) روی گیاه اجیلوپس اشاره نمود. در بسیاری از پژوهش‌ها وجود یک رابطه آنتاگونیستی بین سدیم و پتاسیم گزارش شده است، به‌نحوی‌که غلظت زیاد سدیم در محیط خارج از ریشه به‌طور چشم‌گیری بر جذب پتاسیم تأثیرگذار است و آن را کاهش می‌دهد (میرمحمدی میدی و قره‌یاضی، ۱۳۸۱). با توجه به ارتباط منفی و معنی‌دار تجمع سدیم با تحمل به شوری می‌توان نتیجه گرفت که ارقامی که کاهش عملکرد زیستی کمتری در شرایط تنش دارند، از ورود و انتقال سدیم به اندام‌های خود جلوگیری می‌کنند. انتخاب‌پذیری سدیم به پتاسیم می‌تواند به‌عنوان یک شاخص قابل اطمینان برای تحمل به شوری در گیاه مورد استفاده قرار گیرد (Poustini and Siosemardeh, 2004). بر اساس نتایج حاصل از مطالعه حاضر (جدول ۴)، کمترین نسبت میزان سدیم به پتاسیم در محیط تنش مربوط به لاین 61TP با مقدار ۰/۳۰ بود. رقم کوسه، والد زراعی T، ژنوتیپ G52 و لاین 156TO از ژنوتیپ‌هایی بودند که نسبت سدیم به پتاسیم کمی داشتند. نسبت پتاسیم به سدیم (K^+/Na^+) به‌عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی در تحمل به تنش در گلرنگ در نظر گرفته می‌شود (Mosupiemang et al., 2022). برخی محققین،

از شاخص ترکیبی تحمل (Combination of Significant Indices) CSI که برای شناسایی لاین‌های متحمل به تنش در سال ۲۰۲۲ معرفی شد، نیز استفاده گردید (Sabouri et al., 2022). برای محاسبه شاخص ترکیبی خطی از شاخص‌های STI (Stress Tolerance Index)، GMP (Geometric Mean Productivity) HM (Harmonic Mean) و MP (Mean Productivity) استفاده می‌شود. در واقع، این شاخص با استفاده از عملکرد هر ژنوتیپ در دو محیط تنش و عدم تنش و همبستگی این دو پارامتر با شاخص‌های ذکرشده محاسبه می‌شود.

$$CSI_i = 1/2 [(r_{YP.MP} \times MP_i) + (r_{YP.GMP} \times GMP_i) + (r_{YP.HM} \times HM_i) + (r_{YP.STI} \times STI_i) + (r_{YS.MP} \times MP_i) + (r_{YS.GMP} \times GMP_i) + (r_{YS.HM} \times HM_i) + (r_{YS.STI} \times STI_i)]$$

در رابطه فوق CSI_i شاخص ترکیبی تحمل برای ژنوتیپ شماره i ، $r_{YP.MP}$ همبستگی عملکرد در شرایط بدون تنش و شاخص MP، $r_{YP.GMP}$ همبستگی عملکرد در شرایط بدون تنش و شاخص GMP، $r_{YP.HM}$ همبستگی عملکرد در شرایط بدون تنش و شاخص HM، $r_{YP.STI}$ همبستگی عملکرد در شرایط بدون تنش و شاخص STI، $r_{YS.MP}$ همبستگی عملکرد در شرایط تنش و شاخص MP، $r_{YS.GMP}$ همبستگی عملکرد در شرایط تنش و شاخص GMP، $r_{YS.HM}$ همبستگی عملکرد در شرایط تنش و شاخص HM، $r_{YS.STI}$ همبستگی عملکرد در شرایط تنش و شاخص STI است.

نتایج و بحث

تجزیه واریانس صفات: نتایج تجزیه واریانس (جدول ۱ و ۲) نشان داد که تمام عوامل تیماری مورد مطالعه روی مقادیر عنصر سدیم، عنصر پتاسیم و نسبت میزان سدیم به پتاسیم در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بودند. همچنین آثار آن‌ها بر فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، آسکوربات و گایاکول پراکسیداز در سطح احتمال یک و پنج درصد معنی‌دار شدند. بنابراین محیط‌های تنش شوری و خشکی تأثیر معنی‌داری را بر صفات مورد مطالعه اعمال کرده است. از طرفی با توجه به وجود

جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) برای صفات مقدار عنصر سدیم، پتاسیم و نسبت میزان سدیم به پتاسیم برگ در ژنوتیپ‌های مورد ارزیابی در محیط نرمال و تنش شوری

منابع تغییرات	درجه آزادی	سدیم (mg/g)	پتاسیم (mg/g)	نسبت سدیم به پتاسیم
محیط	۱	۵۴/۰۳**	۷۸۴/۲۰**	۰/۹۴**
تکرار (محیط)	۴	۰/۰۰۰۶	۰/۱۳	۰/۰۰۰۰۲
ژنوتیپ	۹	۴/۲۷**	۷۶**	۰/۰۷**
محیط × ژنوتیپ	۹	۲/۳۵**	۱۱/۲۲**	۰/۰۳**
خطا	۳۶	۰/۰۵	۰/۶	۰/۰۰۰۶
ضریب تغییرات (%)		۴/۵۲	۴/۲۰	۷/۳۰

ns, *, ** به ترتیب بیانگر عدم معنی داری و معنی داری در سطح ۵ و ۱ درصد است.

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) برای صفات فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، آسکوربات و گایاکول پراکسیداز در ژنوتیپ‌های مورد ارزیابی در سه محیط نرمال، تنش شوری و تنش خشکی

منابع تغییرات	درجه آزادی	فعالیت کاتالاز	فعالیت آسکوربات	فعالیت گایاکول پراکسیداز
محیط	۲	۰/۲۶**	۳۱/۴۴*	۰/۴۲*
تکرار (محیط)	۴	۰/۰۰۴	۲/۲۲	۰/۱۶
ژنوتیپ	۹	۰/۲۶**	۷/۰۶**	۲/۳۳**
محیط × ژنوتیپ	۱۸	۰/۱۰**	۵/۶۴**	۱/۲۹**
خطا	۵۴	۰/۰۱	۰/۹	۰/۲۳
ضریب تغییرات (%)		۱۶/۲۰	۱۶/۹۳	۲۰/۹۲

ns, *, ** به ترتیب بیانگر عدم معنی داری و معنی داری در سطح ۵ و ۱ درصد است.

ارقامی را به عنوان متحمل به شوری معرفی کرده‌اند که بتوانند در شرایط شوری دفع سدیمی بالایی از خود نشان دهند، نسبت سدیم به پتاسیم را در بخش‌هایی مختلف خود به خوبی در حد قابل قبولی نگه دارند و از تجمع یون سدیم در بافت‌های جوان‌تر جلوگیری کرده و آن را به بخش‌های پیرتر انتقال دهند (Sytar et al., 2017).

با توجه به نتایج در جدول ۳۵، مقدار فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نیز در اثر تنش شوری افزایش یافت. یکی از سازوکارهای گیاه برای تحمل شرایط تنش، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی است. بسیاری از مقالات و گزارش‌ها، افزایش معنی داری در فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی را تحت تنش شوری ثبت کرده‌اند. مطالعه Song و همکاران (۲۰۲۴)

نشان داد گیاه گلرنگ تحت تنش‌های NaCl و NaHCO₃ توانست از سامانه آنتی‌اکسیدانی برای مقابله با آسیب اکسیداتیو استفاده کند (Song et al., 2024). نتایج مطالعه Rao و Zheng (۲۰۲۵) نشان داد در شرایط تنش شوری و خشکی، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند SOD، CAT، و APX افزایش یافت. این افزایش به کاهش آسیب‌های اکسیداتیو و افزایش پایداری غشاهای سلولی کمک می‌کند (Rao and Zheng, 2025). Haghpanah و همکاران (۲۰۲۴) نشان دادند تنش خشکی منجر به تولید ROS (گونه‌های فعال اکسیژن) می‌شود که به DNA، پروتئین‌ها و غشاهای سلولی آسیب می‌رساند. فعال‌سازی سامانه‌های آنتی‌اکسیدانی آنزیمی مانند سوپراکسید دیسموتاز (SOD)، کاتالاز (CAT) و آسکوربات پراکسیداز

جدول ۳- دامنه تغییرات و میانگین صفات فیزیولوژیک و عملکرد دانه برای ۱۰ ژنوتیپ مورد مطالعه در سه محیط نرمال، تنش شوری و تنش خشکی

صفت	دامنه		میانگین		درصد تغییر در اثر تنش	
	نرمال	شوری	نرمال	شوری	خشکی	شوری
مقدار سدیم (mg/g)	۳/۳۳-۴/۶۳	۳/۹۶-۹/۴۷	۳/۷۵ ^b	۶/۰۸ ^a	-	۶۲/۰۴
مقدار پتاسیم (mg/g)	۱۳/۸۳-۳۰/۶۸	۸/۱۸-۲۵/۳۷	۲۲/۸۳ ^a	۱۳/۹۷ ^b	-	-۳۸/۸۰
نسبت سدیم به پتاسیم	۰/۱۴-۰/۲۹	۰/۳۰-۱/۰۸	۰/۱۷ ^b	۰/۴۸ ^a	-	۱۷۹/۵۷
کاتالاز (unit/mg pro)	۰/۲۵-۱/۲۵	۰/۴۳-۱/۳۹	۰/۵۸ ^b	۰/۷۸ ^a	۰/۷۶ ^a	۳۲/۰۵
آسکوربات (unit/mg pro)	۲-۹/۹۶	۴/۴۰-۱۰/۵۱	۵/۴۱ ^b	۷/۳۳ ^a	۴/۹۷ ^b	۳۵/۵۸
پراکسیداز (unit/mg pro)	۱/۰۳-۴/۹۸	۱/۳۰-۳/۹۳	۲/۲۱ ^a	۲/۴۴ ^a	۲/۱۷ ^a	۱۰/۱۶
محتوای نسبی آب برگ	۷۰/۴۱-۹۵/۶۷	۴۸/۵۹-۷۲/۲۶	۸۷/۸۷ ^a	۴۳/۴۶-۶۵/۳۱	۶۰ ^b	۵۲/۸۹ ^c
عملکرد دانه (gplant ⁻¹)	۱۲/۸۰-۳۶/۴۰	۹/۴۶-۲۱/۸۲	۲۰/۶۰ ^a	۵/۲۱-۱۵/۳۰	۱۴/۵۴ ^b	۹/۷۰ ^c

برای هر صفت، میانگین تیمارهای دارای حداقل یک حرف مشترک، اختلاف آماری معنی داری با یکدیگر ندارند (براساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد).

جدول ۴- میانگین مقادیر عنصر سدیم، پتاسیم، نسبت میزان سدیم به پتاسیم برگ همراه با شاخص‌های تحمل و پایداری عملکرد برای ۱۰ ژنوتیپ منتخب نو ترکیب (RILs) و جهانی گیاه گلرنگ در دو محیط نرمال و تنش شوری

کد ژنوتیپ	سدیم (mg/g)		پتاسیم (mg/g)		شاخص‌های تحمل به تنش		N/K	والدین و لاین‌های نو ترکیب	ارقام جهانی و رایج تجاری	رتبه
	نرمال	شوری	نرمال	شوری	CSI	YSI				
T	۳/۶۱	۶/۱۳	۲۵/۳۷	۱۷/۸۳	۳۳/۱۵	۲۹/۶۸	۰/۳۴	۰/۱۴	۰/۵۴	۱
51TP	۳/۴۰	۵/۰۳	۲۰/۱۴	۱۰/۴۳	۴۲/۰۲	۳۵/۵۱	۰/۴۹	۰/۱۷	۰/۴۵	۲
61TP	۳/۵۴	۴/۳۹	۲۳/۳۳	۱۴/۴۰	۵۶/۳۱	۴۴/۹۷	۰/۳۰	۰/۱۵	۰/۳۵	۳
142TO	۳/۷۰	۴/۶۳	۲۱/۰۱	۸/۱۸	۴۷/۳۳	۴۰/۱۹	۰/۵۷	۰/۱۸	۰/۴۵	۴
156TO	۳/۴۶	۴/۰۷	۲۵/۰۸	۱۰/۴۳	۴۳/۱۵	۳۸/۲۵	۰/۳۹	۰/۱۴	۰/۶۵	۵
G47 (PI 470942)	۳/۹۶	۹/۲۳	۱۳/۸۳	۸/۷۴	۴۷/۲۷	۳۹/۷۹	۱/۰۶	۰/۲۹	۰/۴۹	۶
G52 (PI 572425)	۴/۶۳	۸/۳۰	۳۰/۶۸	۲۴/۲۱	۶۴/۶۰	۵۴/۴۱	۰/۳۵	۰/۱۵	۰/۳۸	۷
G59 (PI 657801)	۴/۰۷	۷/۴۴	۲۲/۱۷	۱۸/۱۲	۴۹/۱۶	۴۴/۹۰	۰/۴۲	۰/۱۹	۰/۵۳	۸
PADIDE	۳/۴۶	۶/۶۶	۲۳/۶۲	۱۲/۴۱	۳۴/۵۹	۳۰/۰۸	۰/۵۴	۰/۱۵	۰/۳۷	۹
KOOSE	۳/۷۰	۴/۹۰	۲۳/۰۴	۱۴/۹۷	۴۱/۲۵	۳۹/۸۴	۰/۳۳	۰/۱۶	۰/۴۹	۱۰
LSD(5%)	۰/۲۰	۰/۶۸	۱/۸۱	۱/۶۸	۶/۴۲	۵/۷۴	۰/۰۷	۰/۰۲	۰/۱۹	

افزایش گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) مانند سوپراکسید و پراکسید هیدروژن منجر به اکسیداسیون لیپیدهای غشایی، نقش مهمی در خنثی‌سازی ROS و جلوگیری از آسیب اکسیداتیو دارد. از طرفی در شرایط خشکی شدید،

جدول ۵- میانگین صفات فیزیولوژیک شامل فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی همراه با شاخص‌های تحمل و پایداری عملکرد برای ۱۰ ژنوتیپ منتخب نوترکیب (RILs) و جهانی گیاه گلرنگ در سه محیط نرمال، تنش شوری و خشکی والدین و لاین‌های نو ترکیب ارقام جهانی و رایج تجاری

کد ژنوتیپ	آنزیم کاتالاز (unit/mg pro)			آنزیم آسکوربات (unit/mg pro)			آنزیم پراکسیداز (unit/mg pro)			شاخص‌های تحمل به تنش				
	نرمال	شوری	خشکی	نرمال	شوری	خشکی	نرمال	شوری	خشکی	CSI	YSI	YSI		
والدین و لاین‌های نو ترکیب														
۱	T	۰/۴۱	۰/۶۲	۰/۴۴	۳/۷۰	۵/۸۳	۴/۹۴	۲/۰۳	۲/۵۴	۲/۳۹	۳۳/۱۵	۲۹/۶۸	۰/۷۵	۰/۵۴
۲	51TP	۰/۲۵	۰/۶۶	۰/۸۶	۵/۲۰	۵/۹۵	۵/۷۷	۲/۲۳	۳/۹۳	۲/۳۸	۴۲/۰۲	۳۵/۵۱	۰/۸۰	۰/۴۵
۳	61TP	۰/۳۳	۰/۵۴	۱/۰۷	۲/۵۴	۸/۷۱	۴/۲۸	۱/۲۴	۲/۱۱	۱/۴۲	۵۶/۳۱	۴۴/۹۷	۰/۸۳	۰/۳۵
۴	142TO	۰/۶۰	۱/۰۱	۰/۹۱	۲/۹۹	۷/۱۲	۵/۷۷	۱/۰۹	۲/۲۰	۲/۰۱	۴۷/۳۳	۴۰/۱۹	۰/۷۸	۰/۴۵
۵	156TO	۰/۸۷	۱/۰۳	۱/۰۴	۳/۷۹	۶/۳۷	۳/۸۱	۲/۲۲	۳/۵۸	۳/۰۵	۴۳/۱۵	۳۸/۲۵	۰/۹۲	۰/۶۵
ارقام جهانی و رایج تجاری														
۶	G47	۰/۴۶	۰/۷۱	۰/۴۹	۵/۱۷	۹/۳۱	۷/۰۹	۱/۴۴	۱/۸۷	۲/۲۶	۴۷/۲۷	۳۹/۷۹	۰/۸۹	۰/۴۹
۷	G52	۱/۱۶	۱/۰۵	۰/۹۹	۸/۵۵	۷/۴۴	۵/۶۴	۲/۴۰	۱/۴۹	۲/۰۸	۶۴/۶۰	۵۴/۴۱	۰/۷۰	۰/۳۸
۸	G59	۰/۳۵	۱/۲۳	۱/۰۲	۶/۴۴	۹/۲۹	۲/۸۷	۱/۰۶	۱/۸۱	۱/۵۷	۴۹/۱۶	۴۴/۹۰	۰/۶۷	۰/۵۳
۹	PADIDE	۰/۶۰	۰/۵۳	۰/۵۱	۹/۹۶	۷/۸۰	۵/۱۴	۴	۲/۹۱	۱/۲۳	۳۴/۵۹	۳۰/۰۸	۰/۵۹	۰/۳۷
۱۰	KOOSE	۰/۷۶	۰/۵۰	۰/۳۲	۵/۷۳	۵/۵۱	۴/۴۵	۴/۴۲	۱/۹۴	۳/۳۰	۴۱/۲۵	۳۹/۸۴	۰/۵۰	۰/۴۹
	LSD 5%	۰/۲۳	۰/۲۶	۰/۲۹	۲/۴۴	۲/۲۵	۲/۰۹	۱/۳۸	۰/۸۳	۰/۹۴	۶/۴۲	۵/۷۴	۰/۲۴	۰/۱۹

و همکاران (۲۰۲۲) نشان داد که هر دو تنش شوری و خشکی سبب کاهش قابل توجهی در RWC شدند و در شرایط تنش ترکیبی، شدت این کاهش بیشتر بوده است. همچنین Bijanzadeh و همکاران (۲۰۲۲) گزارش کردند که ژنوتیپ‌های مختلف گلرنگ در پاسخ به تنش خشکی، رفتار متفاوتی در حفظ RWC داشتند. در مجموع، کاهش RWC را می‌توان به کاهش توانایی سامانه ریشه‌ای در جذب آب و نیز افزایش تعرق نسبت داد. این شاخص یکی از مهم‌ترین پارامترهای فیزیولوژیکی برای ارزیابی وضعیت آب موجود در بافت‌های گیاه بوده و توانایی ژنوتیپ‌ها در حفظ آن، شاخصی برای تحمل به تنش‌های محیطی محسوب می‌شود (Bijanzadeh et al., 2022). با توجه به مقایسه میانگین صفات برای ژنوتیپ‌ها (جدول ۶)، ژنوتیپ G59 و لاین 51TP در شرایط تنش خشکی و لاین‌های 51TP و 61TP در شرایط تنش شوری، دارای بیشترین میزان محتوای نسبی آب در

تخریب غشای پلاسمایی و اختلال در عملکرد آنزیم‌ها می‌شود. در اثر اعمال تنش خشکی و شوری در مطالعه حاضر، کاهش عملکرد و محتوای نسبی آب برگ در گلرنگ اتفاق افتاد (جدول ۳). محتوای نسبی آب برگ در اثر شوری حدود ۳۲ درصد و در اثر تنش خشکی حدود ۴۰ درصد کاهش یافت. کاهش در محتوای نسبی آب برگ با کاهش در میزان فتوسنتز و نهایتاً کاهش تولید همراه است. در تنش خشکی گیاه با دوره‌های کاهش دریافت آب مصرفی مواجه می‌شود که باعث کاهش محتوای نسبی آب برگ و عملکرد گیاه می‌شود (Goharrizi et al., 2021). در پژوهش‌های اخیر، کاهش محتوای نسبی آب برگ تحت تنش‌های محیطی به‌ویژه شوری و خشکی گزارش شده است. به‌عنوان نمونه، Fatahiyan و همکاران (۲۰۲۵) نشان دادند که افزایش غلظت نمک در محیط ریشه منجر به کاهش RWC، افت محتوای پتاسیم و رنگدانه‌های فتوسنتزی و افزایش سدیم، MDA و H₂O₂ در گلرنگ می‌گردد. مطالعه‌ای توسط اسماعیل‌زاده Esmailzadeh

جدول ۶- میانگین صفات عملکرد و محتوای نسبی آب برگ همراه با شاخص‌های تحمل و پایداری عملکرد برای ۱۰ ژنوتیپ منتخب نوترکیب (RILs) و جهانی گیاه گلرنگ در سه محیط نرمال، تنش شوری و خشکی

عملکرد دانه (gplant ⁻¹)		محتوای نسبی آب برگ (%)			شاخص‌های تحمل به تنش		کد ژنوتیپ	رتبه			
نرمال	شوری	خشکی	نرمال	شوری	خشکی	YSI شوری			YSI خشکی		
والدین و لاین‌های نو ترکیب											
۱۴/۵۳	۱۰/۸۸	۷/۹۱	۹۳/۲۲	۵۵/۸۹	۵۵/۹۶	۳۳/۱۵	۲۹/۶۸	۰/۷۵	۰/۵۴	T	۱
۱۷/۸۲	۱۴/۱۹	۷/۹۷	۹۰/۸۷	۷۰/۷۶	۵۶/۴۹	۴۲/۰۲	۳۵/۵۱	۰/۸۰	۰/۴۵	51TP	۲
۲۵/۲۴	۲۱/۳۹	۸/۲۴	۸۳/۷۶	۶۳/۴۳	۵۱/۸۴	۵۶/۳۱	۴۴/۹۷	۰/۸۳	۰/۳۵	61TP	۳
۲۰/۲۰	۱۵/۸۴	۹/۱۱	۸۳/۶۲	۴۹/۸۹	۵۴/۲۵	۴۷/۳۳	۴۰/۱۹	۰/۷۸	۰/۴۵	142TO	۴
۱۴/۱۸	۱۱/۶۶	۱۲/۷۳	۸۸/۸۹	۶۰/۶۸	۵۰/۶۷	۴۳/۱۵	۳۸/۲۵	۰/۹۲	۰/۶۵	156TO	۵
ارقام جهانی و رایج تجاری											
۲۱/۰۱	۱۴/۳۲	۷/۷۶	۸۹/۵۶	۵۰/۸۵	۴۸/۴۲	۴۷/۲۷	۳۹/۷۹	۰/۸۹	۰/۴۹	G47	۶
۳۳/۳۹	۱۸/۰۶	۱۲/۸۳	۸۴/۶۷	۵۹/۲۲	۵۳/۵۸	۶۴/۶۰	۵۴/۴۱	۰/۷۰	۰/۳۸	G52	۷
۱۷/۵۶	۱۵/۱۸	۱۳/۳۱	۹۱/۳۳	۵۸/۸۹	۵۷/۱۳	۴۹/۱۶	۴۴/۹۰	۰/۶۷	۰/۵۳	G59	۸
۱۷/۱۰	۱۱/۶۷	۶/۳۲	۸۲/۲۶	۵۴/۴۷	۵۰/۵۶	۳۴/۵۹	۳۰/۰۸	۰/۵۹	۰/۳۷	PADIDE	۹
۲۴/۹۸	۱۲/۲۵	۱۰/۸۱	۹۰/۴۷	۶۰/۲۸	۵۰/۰۵	۴۱/۲۵	۳۹/۸۴	۰/۵۰	۰/۴۹	KOOSE	۱۰
۴/۰۳	۲/۸۰	۲/۱۱	۱۰/۴۸	۸/۲۶	۹/۲۷	۶/۴۲	۵/۷۴	۰/۲۴	۰/۱۹	LSD 5%	

شرایط تنش بودند.

دارای محتوای نسبی آب برگ (RWC) بالا و نسبت پایین سدیم به پتاسیم بودند. علاوه بر این، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در این ژنوتیپ‌ها نیز مشاهده شد که در کنار سایر ویژگی‌های فیزیولوژیک، نشان‌دهنده بروز سازوکارهای مؤثر تحمل به تنش در آن‌هاست. گزارش شده است که فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی می‌تواند به عنوان شاخص اصلاحی برای تحمل به تنش استفاده شوند (Golkar et al., 2021). این نتایج بیانگر توان بالای این ژنوتیپ‌ها در مقابله با شرایط تنش و برتری آن‌ها نسبت به سایر ژنوتیپ‌های منتخب است. در مقابل، رقم پدیده در شرایط تنش با کاهش قابل توجه محتوای نسبی آب برگ و افزایش نسبت سدیم به پتاسیم همراه بود. همچنین فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در این رقم دچار کاهش شد. بر اساس این شواهد، می‌توان نتیجه گرفت که رقم پدیده از نظر فیزیولوژیکی نسبت به شرایط تنش حساس است و همین مسئله منجر به کاهش عملکرد دانه آن در شرایط تنش شده است.

بر اساس نتایج جدول ۶، بیش‌ترین عملکرد دانه در بوته در شرایط نرمال مربوط به ژنوتیپ G52 با مقدار ۳۳/۳۹ گرم در بوته و در شرایط تنش شوری، بیش‌ترین میزان عملکرد دانه در بوته مربوط به ژنوتیپ 61TP با مقدار ۲۱/۳۹ گرم در بوته بود. همچنین در شرایط تنش خشکی، بیش‌ترین عملکرد دانه در بوته مربوط به ژنوتیپ‌های G52، G59 و 156TO به ترتیب با مقادیر ۱۳/۳۱، ۱۲/۸۳ و ۱۲/۷۳ گرم در بوته بود. به‌طور کلی در شرایط تنش شوری و خشکی میانگین عملکرد دانه ژنوتیپ‌ها کاهش یافت (۳۴/۳ درصد در اثر شوری و ۵۴/۴ درصد در اثر خشکی) که در شرایط تنش خشکی این کاهش شدیدتر بود (جدول ۳).

در میان ژنوتیپ‌های مورد بررسی، ژنوتیپ‌های 61TP، G52 و 156TO نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها تحت شرایط تنش از عملکرد دانه بیشتری برخوردار بودند. بروز صفات فیزیولوژیک نیز با عملکرد دانه در تطابق بود، به‌طوری‌که این ژنوتیپ‌ها

جدول ۷- ضرایب همبستگی بین صفات فیزیولوژیک و عملکرد دانه در ۱۰ ژنوتیپ مورد مطالعه در محیط عدم تنش (بالای قطر) و تنش شوری (پایین قطر)

CSI	YSI	Yp	RWC	POD	APX	CAT	Na/K	K	Na	
۰/۶۰	-۰/۴۴	۰/۶۹	-۰/۰۷	-۰/۱۸	۰/۴۰	۰/۵۳	۰/۲۴	۰/۳۱	۱	مقدار عنصر سدیم (Na)
۰/۲۵	-۰/۲۴	۰/۳۴	-۰/۲۲	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۶۲	-۰/۸۳	۱	۰/۳۵	مقدار عنصر پتاسیم (K)
۰/۰۴	-۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۱۸	-۰/۳۳	-۰/۰۳	-۰/۲۷	۱	-۰/۵۷	۰/۵۵	نسبت سدیم به پتاسیم (Na/K)
۰/۲۹	-۰/۶۳	۰/۵۱	-۰/۳۲	۰/۳۹	۰/۳۸	۱	-۰/۰۳	۰/۲۱	۰/۲۰	فعالیت آنزیم کاتالاز (CAT)
۰/۰۵	-۰/۵۱	۰/۲۵	-۰/۲۵	۰/۵۷	۱	۰/۲۸	۰/۴۶	۰/۰۱	۰/۵۶	فعالیت آنزیم آسکوربات (APX)
-۰/۲۰	-۰/۷۱	۰/۱۰	-۰/۰۶	۱	-۰/۴۹	-۰/۱۹	-۰/۰۸	-۰/۵۰	-۰/۵۳	فعالیت آنزیم پراکسیداز (POD)
-۰/۴۹	۰/۰۷	-۰/۴۱	۱	۰/۴۸	-۰/۳۹	-۰/۲۹	-۰/۳۸	۰/۱۶	-۰/۲۷	محتوای نسبی آب برگ (RWC)
۰/۹۳	-۰/۶۱	۱	۰/۰۳	-۰/۴۵	۰/۵۲	۰/۱۵	-۰/۱۲	۰/۲۴	۰/۰۳	عملکرد دانه (Yp)
-۰/۲۸	۱	۰/۱۷	۰/۱۹	۰/۴۱	۰/۳۱	۰/۲۹	-۰/۰۲	-۰/۳۵	-۰/۳۳	شاخص YSI
۱	-۰/۲۸	۰/۹۰	-۰/۰۵	-۰/۶۱	۰/۳۶	۰/۰۸	-۰/۱۴	۰/۴۳	۰/۱۹	شاخص CSI

ضرایب همبستگی بزرگتر از ۰/۶۳ در سطح ۵ درصد و بزرگتر از ۰/۷۶ در سطح ۱ درصد معنی دار است.

جدول ۸- ضرایب همبستگی بین صفات فیزیولوژیک و عملکرد دانه در ۱۰ ژنوتیپ مورد مطالعه در محیط عدم تنش (بالای قطر) و تنش خشکی (پایین قطر)

CSI	YSI	Yp	RWC	POD	APX	CAT	Na/K	K	Na	
۰/۸۰	-۰/۱۱	۰/۶۹	-۰/۰۷	-۰/۱۸	۰/۴۰	۰/۵۳	۰/۲۴	۰/۳۱	۱	مقدار عنصر سدیم (Na)
۰/۴۹	۰/۱۶	۰/۳۴	-۰/۲۲	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۶۲	-۰/۸۳	۱	-	مقدار عنصر پتاسیم (K)
-۰/۰۹	-۰/۲۲	۰/۰۲	۰/۱۸	-۰/۳۳	-۰/۰۳	-۰/۲۷	۱	-	-	نسبت سدیم به پتاسیم (Na/K)
۰/۶۶	۰/۰۹	۰/۵۱	-۰/۳۲	۰/۳۹	۰/۳۸	۱	-	-	-	فعالیت آنزیم کاتالاز (CAT)
۰/۲۱	-۰/۱۹	۰/۲۵	-۰/۲۵	۰/۵۷	۱	-۰/۳۶	-	-	-	فعالیت آنزیم آسکوربات (APX)
۰/۰۱	-۰/۲۰	۰/۱۰	-۰/۰۶	۱	۰/۴۱	-۰/۳۰	-	-	-	فعالیت آنزیم پراکسیداز (POD)
-۰/۱۷	۰/۴۶	-۰/۴۱	۱	۰/۶۰	۰/۷۷	۰/۳۸	-	-	-	محتوای نسبی آب برگ (RWC)
۰/۸۵	-۰/۵۷	۱	۰/۷۵	۰/۵۹	۰/۳۴	۰/۴۹	-	-	-	عملکرد دانه (Yp)
-۰/۰۷	۱	-۰/۱۷	-۰/۶۰	-۰/۲۳	-۰/۸۲	۰/۳۵	-	-	-	شاخص YSI
۱	۰/۵۸	۰/۹۰	۰/۸۰	۰/۷۱	۰/۵۹	۰/۳۵	-	-	-	شاخص CSI

ضرایب همبستگی بزرگتر از ۰/۶۳ در سطح ۵ درصد و بزرگتر از ۰/۷۶ در سطح ۱ درصد معنی دار است.

آب) تحمل بیشتری نسبت به مقابله با تنش خشکی نشان داده‌اند.

همبستگی صفات: ضرایب همبستگی بین صفات در جدول‌های ۷ و ۸ آمده است. با توجه به ضرایب همبستگی، مشاهده می‌شود که در شرایط تنش خشکی (پایین قطر جدول

براساس نتایج این مطالعه، با توجه به افزایش فعالیت آنزیمی و همچنین تغییر کمتر محتوای نسبی آب برگ در اثر تنش شوری در مقایسه با تنش خشکی و به دنبال آن کاهش عملکرد بیشتر در اثر تنش خشکی، می‌توان نتیجه گرفت که ژنوتیپ‌های مورد مطالعه در مقابل تنش شوری اعمال شده (۲۰۰ میلی‌مولار نمک

داشت، درحالی که میزان پتاسیم در بافت برگ کاهش یافت. افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در مواجهه با تنش‌های شوری و خشکی، به‌ویژه در ژنوتیپ‌های متحمل، حاکی از نقش کلیدی سامانه‌های دفاعی آنتی‌اکسیدانی در خنثی‌سازی گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) و حفظ پایداری غشاهای سلولی است. در مقابل، ارقامی نظیر رقم پدیده با کاهش فعالیت آنزیمی و اختلال در تنظیم یون‌ها، حساسیت بیشتری نسبت به تنش‌های اعمال‌شده نشان دادند. ضرایب همبستگی نشان داد که رابطه مثبت و معنی‌داری ($r=0.75$) بین محتوای نسبی آب برگ و عملکرد دانه در ارقام مورد بررسی وجود داشت. در شرایط تنش شوری نیز مقدار سدیم با فعالیت آنزیم آسکوربات و همچنین عملکرد دانه و شاخص تحمل دارای همبستگی مثبت و معنی‌داری بودند. از این ارتباطات می‌توان در انتخاب غیرمستقیم برای بهبود تحمل به خشکی و شوری استفاده کرد.

نتایج نشان داد ژنوتیپ‌های مورد مطالعه در مقابل تنش شوری تحمل بیشتری نسبت به تنش خشکی دارند. رقم شاهد پدیده در هر سه شرایط محیطی نرمال، تنش شوری و خشکی عملکرد کمی داشت درحالی که در شرایط تنش خشکی رقم شاهد کوسه اصفهان تحمل به تنش متوسطی داشت. بالاترین شاخص تحمل به تنش (CSI) در هر دو شرایط تنش خشکی و شوری مربوط به ژنوتیپ G52 بود. تحت تنش شوری، ژنوتیپ 61TP شاخص تحمل به تنش و عملکرد بهتری نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها نشان داد. بنابراین می‌توان این ژنوتیپ را به عنوان ژنوتیپ متحمل به تنش شوری دانست. ژنوتیپ G59 شاخص تحمل به تنش و عملکرد دانه مناسبی را تحت تنش خشکی نشان داد. از ژنوتیپ‌های شناسایی‌شده می‌توان برای آزادسازی ارقام جدید یا تلاقی و استفاده در مطالعات آتی استفاده کرد.

۸) بین محتوای نسبی آب برگ با فعالیت آنزیم آسکوربات همبستگی مثبت و معنی‌داری ($r=0.77$) وجود دارد. ضرایب همبستگی همچنین نشان داد که رابطه مثبت و معنی‌داری ($r=0.75$) بین محتوای نسبی آب برگ و عملکرد دانه در ارقام مورد بررسی وجود داشت. تفاوت محتوای نسبی آب برگ در ارقام مختلف می‌تواند به توانایی آن‌ها در جذب آب از خاک یا توانایی بستن روزنه‌ها و تعرق کمتر در شرایط تنش مربوط باشد. همچنین از وجود همبستگی مثبت و معنی‌دار بین این صفت با فعالیت آنزیم آسکوربات می‌توان نتیجه گرفت که در این شرایط افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی در گیاه برای مقابله با تنش رخ می‌دهد. بنابراین محتوای نسبی آب برگ در واقع ابزار بسیار مناسبی برای گزینش در شرایط تنش خشکی است و ارقامی که بدون بستن روزنه‌های خود توانایی حفظ آب بیشتری دارند، برای مناطق خشک مناسب‌تر هستند. بر اساس نتایج مطالعه Alizadeh و همکاران (۲۰۲۰)، نیز همبستگی مثبت و قوی بین STI با عملکرد دانه، RWC، پرولین و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مشاهده و این شاخص به‌عنوان معیار مناسبی برای غربالگری ژنوتیپ‌های متحمل معرفی شده است. این نتایج می‌توانند در راستای انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل‌تر به تنش در برنامه‌های به‌نژادی مفید باشند.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که نمونه‌های گلرنگ انتخاب‌شده از مطالعات قبلی، به واسطه تلاقی بین‌گونه‌ای یا انتخاب درون ژرم‌پلاسما خارجی، از پتانسیل بالایی برای بهبود تحمل به تنش شوری و خشکی برخوردار بودند. تنش خشکی و شوری در گیاه گلرنگ، باعث کاهش عملکرد (به ترتیب ۳۴ و ۵۴ درصد) و محتوای نسبی آب برگ (به ترتیب ۳۲ و ۴۰ درصد) و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (آسکوربات پراکسیداز، پراکسیداز، کاتالاز) گردید. تنش شوری افزایش معنی‌داری بر مقدار عنصر سدیم و نسبت میزان سدیم به پتاسیم در برگ

منابع

- ابوالحسنی، خیراله، و سعیدی، قدرت‌اله (۱۳۸۵). بررسی صفات زراعی ژنوتیپ گلرنگ در دو رژیم رطوبتی در اصفهان. علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۳(۴)، ۴۳-۵۴. <https://sid.ir/paper/9791/fa>
- امیدی، امیرحسین، و اکبرلو، حسین، و صمدی فیروزآبادی، بصیر (۱۳۹۳). گلرنگ (خواص، انواع، ارقام، تولید و فراوری). انتشارات دانش‌نگار.
- زارعی سودانی، حسینعلی (۱۴۰۰). غربالگری برای تحمل به تنش شوری در لاین‌های خویش‌آمیخته نوترکیب (RILs) حاصل از تلاقی بین‌گونه‌ای و بخشی از ژرم‌پلاسما جهانی گلرنگ درکشت پاییزه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- شیراوند، رضا، و مجیدی، محمد مهدی (۱۳۹۲). تحلیل ارتباط ویژگی‌های مختلف در ژنوتیپ‌های پنج گونه جنس *Carthamus* تحت شرایط عادی و کم آبیاری. تولید و فراوری محصولات زراعی و باغی، ۳(۸)، ۱۴۹-۱۶۳. <http://jcjpp.iut.ac.ir/article-1-1832-fa.html>
- شیراوند، رضا، و مجیدی، محمد مهدی (۱۳۹۳). مقایسه گونه‌های وحشی و اهلی گلرنگ از نظر تحمل به تنش خشکی و تنوع صفات مرفولوژیک و زراعی. پژوهش‌های زراعی ایران، ۱۲(۴)، ۷۳۸-۷۵۰. <https://doi.org/10.22067/gsc.v12i4.24687>
- ملکی‌نژاد، رضا، و مجیدی، محمد مهدی (۱۳۹۴). ارزیابی ژرم‌پلاسماهای داخلی و خارجی گلرنگ زراعی در شرایط نرمال و تنش خشکی. پژوهشنامه اصلاح گیاهان زراعی، ۷(۱۵)، ۱-۱۳.
- منصوری، سرور (۱۴۰۱). غربالگری برای تحمل به تنش شوری در لاین‌های خویش‌آمیخته نوترکیب (RILs) حاصل از تلاقی بین‌گونه‌ای و بخشی از ژرم‌پلاسما جهانی گلرنگ در کشت بهار. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- میرمحمدی میبیدی، سید علی‌محمد، و قره‌یاضی، بهزاد (۱۳۸۱). جنبه‌های فیزیولوژی و به‌نژادی تنش شوری گیاهان زراعی. انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.
- Aebi, H. (1984). Catalase in vitro. In *Methods in Enzymology*, 105, 121-126. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(84\)05016-3](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(84)05016-3)
- Alizadeh Yeloojeh, K., Saeidi, G., & Ehsanzadeh, P. (2020). Effectiveness of physiological traits in adopting safflower (*Carthamus tinctorius* L.) genotypes to water deficit condition. *International Journal of Plant Production*, 14(1), 155-164. <https://doi.org/10.1007/s42106-019-00075-3>
- Amini, F., Saeidi, G., & Arzani, A. (2008). Study of genetic diversity in safflower genotypes using agro-morphological traits and RAPD markers. *Euphytica*, 163, 21-30. <https://doi.org/10.1007/s10681-007-9556-6>
- Arzani, A., & Ashraf, M. (2016). Smart engineering of genetic resources for enhanced salinity tolerance in crop plants. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 35(3), 146-189. <https://doi.org/10.1080/07352689.2016.1203854>
- Ashri, A. (1975). Evaluation of the germ plasm collection of safflower, *Carthamus tinctorius* LV distribution and regional divergence for morphological characters. *Euphytica*, 24(3), 651-659. <https://doi.org/10.1007/BF00132903>
- Ashri, A., & Knowles, P. F. (1960). Cytogenetics of safflower (*Carthamus* L.) species and their hybrids 1. *Agronomy Journal*, 52(1), 11-17. <https://doi.org/10.2134/agronj1960.00021962005200010004x>
- Bouslama, M., & Schapaugh Jr, W. T. (1984). Stress tolerance in soybeans. I. Evaluation of three screening techniques for heat and drought tolerance 1. *Crop Science*, 24(5), 933-937. <https://doi.org/10.2135/cropsci1984.0011183X002400050026x>
- 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. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3)
- Bijanzadeh, E., Moosavi, S. M., & Bahadori, F. (2022). Quantifying water stress of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) cultivars by crop water stress index under different irrigation regimes. *Heliyon*, 8(3). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09010>
- Cao, Y., Turk, K., Bibi, N., Ghafoor, A., Ahmed, N., Azmat, M., & Ahanger, M. A. (2025). Nanoparticles as catalysts of agricultural revolution: Enhancing crop tolerance to abiotic stress: A review. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1510482. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1510482>

- Chance, B., & Maehly, A. C. (1955). Assay of catalases and peroxidases. *Methods of Biochemical Analysis*, 1, 357-424. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(55\)02300-8](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(55)02300-8)
- Deshpande, R. B. (1952). Wild safflower (*Carthamus oxyacantha* Bieb.)-a possible oilseed crop for the desert and arid regions. *Indian Journal of Genetics and Plant Breeding*, 12, 10-13.
- Estilai, A., & Knowles, P. F. (1976). Cytogenetic studies of *Carthamus divaricatus* with eleven pairs of chromosomes and its relationship to other *Carthamus* species (Compositae). *American Journal of Botany*, 63(6), 771-782. <https://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1976.tb11866.x>
- Ebrahimi, F., Majidi, M. M., Arzani, A., & Mohammadi-Nejad, G. (2016). Oil and seed yield stability in a worldwide collection of safflower under arid environments of Iran. *Euphytica*, 212, 131-144. <https://doi.org/10.1007/s10681-016-1779-y>
- Ebrahim, F., Arzani, A., Rahimmalek, M., Sun, D., & Peng, J. (2020). Salinity tolerance of wild barley *Hordeum vulgare* ssp. spontaneum. *Plant Breeding*, 139(2), 304-316. <https://doi.org/10.1111/pbr.12770>
- Espanani, S., Majidi, M. M., Saeidi, G., & Alaei, H. (2019). Physiological aspects of inter-specific gene introgression to improve drought tolerance in safflower. *Euphytica*, 215, 1-18. <https://doi.org/10.1007/s10681-019-2477-3>
- Espanani, S., Majidi, M. M., Saeidi, G., Alaei, H., & Rezaei, V. (2019). Wide hybridization and introgression breeding in safflower: Effectiveness of different selection methods. *Plant Breeding*, 138(6), 846-861. <https://doi.org/10.1111/pbr.12713>
- Esmailzadeh, M., Babazadeh, H., Naghavi, H., Saremi, A., & Shiresmaeili, G. (2022). Growth, photosynthesis and production of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) in response to different levels of salinity and drought. *International Agrophysics*, 36(2). <https://doi.org/10.31545/intagr/147892>
- Fatahiyan, F., Najafi, F., & Shirkhani, Z. (2025). Enhancing salt stress tolerance in *Carthamus tinctorius* L. through selenium soil treatment: Anatomical, biochemical, and physiological insights. *BMC Plant Biology*, 25(1), 100. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06078-9>
- Gao, J. F. (2006). *Technique of Phytophysiology Experiments*. 1st Ed. Higher Education Press, Shaanxi, China.
- Goharrizi, K. J., Hamblin, M. R., Karami, S., & Nazari, M. (2021). Physiological, biochemical, and metabolic responses of abiotic plant stress: Salinity and drought. *Turkish Journal of Botany*, 45(7), 623-642. <https://doi.org/10.3906/bot-2108-30>
- Golkar, P., Hamzeh, E., Mirmohammadi Maibody, S. A., & Taghizadeh, M. (2021). Safflower's (*Carthamus tinctorius* L.) physio-biochemical mechanisms to improve its drought tolerance. *Acta Physiologiae Plantarum*, 43(5), 82. <https://doi.org/10.1007/s11738-021-03254-w>
- Haghpahan, M., Hashemipetroudi, S., Arzani, A., & Araniti, F. (2024). Drought tolerance in plants: Physiological and molecular responses. *Plants*, 13(21), 2962. <https://doi.org/10.3390/plants13212962>
- Leo, M. W. (1971). Atomic absorption and flame photometry: Techniques and uses in soil, plant, and water analysis. In *Instrumental Methods for Analysis of Soils and Plant Tissue* (eds. Isaac, R. A. and Kerber, J. D.) Pp. 17-37. Soil Science Society of America.
- Kiani, R., Arzani, A., & Habibi, F. (2015). Physiology of salinity tolerance in *Aegilops cylindrica*. *Acta Physiologiae Plantarum*, 37, 1-10. <https://doi.org/10.1007/s11738-015-1881-0>
- Majidi, M. M., Tavakoli, V., Mirlohi, A., & Sabzalian, M. R. (2011). Wild safflower species (*Carthamus oxyacanthus* Bieb.): A possible source of drought tolerance for arid environments. *Australian Journal of Crop Science*, 5(8), 1055-1063. <https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.707712809752839>
- Majidi, M. M., & Zadhoush, S. (2014). Molecular and morphological variation in a world-wide collection of safflower. *Crop Science*, 54(5), 2109-2119. <https://doi.org/10.2135/cropsci2013.12.0850>
- Mosupiemang, M., Emongor, V. E., & Malambane, G. (2022). A review of drought tolerance in safflower. *International Journal of Plant and Soil Science*, 34(10), 140-149. <http://dx.doi.org/10.9734/IJPSS/2022/v34i1030930>
- Onder, S., Dayan, E., Karakurt, Y., & Tonguc, M. (2022). Changes in germination, antioxidant enzyme activities and biochemical contents of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) under different salinity levels. *Suleyman Demirel University Faculty of Arts and Science Journal of Science*, 17(1), 185-194.
- Nakano, Y., & Asada, K. (1981). Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. *Plant and Cell Physiology*, 22(5), 867-880. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.pcp.a076232>
- Poustini, K., & Siosemardeh, A. (2004). Ion distribution in wheat cultivars in response to salinity stress. *Field Crops Research*, 85(2-3), 125-133. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(03\)00157-6](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(03)00157-6)
- Rao, M. J., & Zheng, B. (2025). The Role of polyphenols in abiotic stress tolerance and their antioxidant properties to scavenge reactive oxygen species and free radicals. *Antioxidants*, 14(1), 74. <https://doi.org/10.3390/antiox14010074>
- Sabouri, A., Dadras, A. R., Azari, M., Saberi Kouchesfahani, A., Taslimi, M., & Jalalifar, R. (2022). Screening of rice drought-tolerant lines by introducing a new composite selection index and competitive with multivariate methods. *Scientific Reports*, 12(1), 2163. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06123-9>

- Sehgal, D., Rajpal, V. R., & Raina, S. N. (2008). Chloroplast DNA diversity reveals the contribution of two wild species to the origin and evolution of diploid safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Genome*, 51(8), 638-643. <https://doi.org/10.1139/G08-049>
- Shafiei-Koij, F., Majidi, M. M., Mirlohi, A., Saeidi, G., Barthet, V. J., & Eskini, S. (2019). The use of wild relatives of safflower to increase genetic diversity for fatty acid composition and drought tolerance. *Crop Science*, 59(5), 2109-2118. <https://doi.org/10.2135/cropsci2019.01.0068>
- Song, L., Yu, Y., Chen, H., Feng, Y., Chen, S., Zhang, H., & Wang, Y. (2024). Response of photosynthetic characteristics and antioxidant system in the leaves of safflower to NaCl and NaHCO₃. *Plant Cell Reports*, 43(6), 146. <https://doi.org/10.1007/s00299-024-03234-7>
- Sytar, O., Brestic, M., Zivcak, M., Olsovska, K., Kovar, M., Shao, H., & He, X. (2017). Applying hyperspectral imaging to explore natural plant diversity towards improving salt stress tolerance. *Science of the Total Environment*, 578, 90-99. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.014>
- Vilatersana, R., Garnatje, T., Susanna, A., & Garcia-Jacas, N. (2005). Taxonomic problems in *Carthamus* (Asteraceae): RAPD markers and sectional classification. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 147(3), 375-383. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8339.2005.00375.x>

Response of ion contents and physiological traits to salinity and drought stress and genotype selection in safflower (*Carthamus tinctorius*)

Mina Amiri, Mohammad Mahdi Majidi*, Ghodratollah Saeidi

Department of agronomy and Plant Breeding, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan 84156-83111, Iran

(Received: 2025/05/03, Accepted: 2025/07/08)

Abstract

Abiotic stresses, including salinity and drought, have a significant role in reducing plant yield. Physiological traits are more effective than morphological and agronomic traits in identifying and differentiating plant responses to stress conditions and can serve as more efficient indicators for screening stress-tolerant genotypes. Interspecific hybridization can be used to enhance genetic diversity, transfer adaptability, and improve tolerance to salinity and drought stress, leading to the development of new cultivars. In this study, 10 genotypes, including four recombinant inbred lines (RILs) derived from interspecific crosses between *C. tinctorius* and *C. palaestinus* (coded as TP) and *C. oxyacanthus* (coded as TO), the parental species *C. tinctorius*, two commercial cultivars (Kooseh and Padideh), and three elite genotypes selected from previous studies, were evaluated under three environments: drought (90% soil moisture depletion), normal (50% soil moisture depletion), and salinity (EC = 20 dS/m). The results revealed significant genetic diversity among the studied genotypes in terms of all traits and tolerance to salinity and drought stress. Both drought and salinity stress reduced seed yield (by 34% and 54%, respectively) and relative leaf water content (by 32% and 40%, respectively) while increasing the activity of antioxidant enzymes (ascorbate peroxidase, peroxidase, and catalase). Correlation analysis indicated a significant positive relationship between relative leaf water content and seed yield in the studied genotypes. Given the more increased enzymatic activity under salinity stress and the lesser reduction in relative leaf water content compared to drought stress, followed by a greater decline in seed yield under drought, it can be concluded that the studied genotypes exhibited higher tolerance to salinity stress than to drought stress. Tolerant genotypes for both drought and salinity conditions were identified: genotype 61TP (derived from interspecific hybridization) was recognized as salinity-tolerant, genotype G59 (a global selection) as drought-tolerant, while genotype G47 (a global selection) and the commercial cultivar Padideh were identified as stress-sensitive. The identified genotypes can be utilized for releasing new cultivars or further crossing in future breeding programs.

Keywords: Ascorbate peroxidase, Safflower, Water deficit, Relative water content

Corresponding author, Email: majidi@iut.ac.ir