University of Tehran Press

Journal of Crops Improvement

Online ISSN: 2345-6957

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

Investigate the effect of drought stress on root and shoot characteristics of safflower genotypes (*Carthamus tinctorius* L.)

Hamid Jabbari[1]✉ | Majid Gholam Hosseini[2] | Mohammad Bagher Valipour[3] | Mohammad Reza Nazari[4] | Amir Hasan Omidi[5] | Habib Tashakori Meymand[6]

1. Corresponding Author, Seed and Plant Improvement Institute (SPII), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. E-mail: h.jabbari@areeo.ac.ir
2. Seed and Plant Improvement Institute (SPII), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. E-mail: m.gholamhoseini@areeo.ac.ir
3. Seed and Plant Improvement Institute (SPII), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. E-mail: m.valipour@areeo.ac.ir
4. Seed and Plant Improvement Institute (SPII), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. E-mail: mrnazari@spii.ir
5. Seed and Plant Improvement Institute (SPII), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. E-mail: ah.omidi@areeo.ac.ir
6. Seed and Plant Improvement Institute (SPII), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. E-mail: h.tashakori@areeo.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 12 November 2022
Received in revised form
14 June 2023
Accepted 19 June 2023
Published online
20 September 2023

Keywords:
Cultivars
Flowering time
Physiological characteristics
Relative water content (RWC)
Root diameter
SPAD value

ABSTRACT

Objective: This research was carried out in order to investigate the effect of irrigation regimes on morphological traits of root and shoot of safflower genotypes.

Methods: A field experiment has been conducted via polyvinyl chloride (PVC) pipes at research field of Seed and Plant Improvement Institute in Karaj, during 2019-2020. A factorial experiment has been laid out in a randomized complete block design with three replications. This study deals with six genotypes of safflower (Varamin landrace, Hamand landrace, Kazakhstan genotype and Amir, Goldasht and Pernian cultivars) in two irrigation regimes, including full irrigation (control) and drought stress (Irrigation after depletion of 40% and 80% of soil available moisture respectively) treatments.

Results: The results showed that under drought stress conditions, root length and root diameter have increased by 28.6% and 13.6%, respectively and root dry weight, leaf relative water content (RWC), number of bolls, number of seeds per plant and seed yield per plot and was decreased by 23.6%, 15.2%, 25.4%, 63.3%, and 74.9%, respectively. Under full irrigation conditions, Amir with suitable root system (root dry weight 7.7 g and root length 71 cm) and maximum number of seeds had the highest seed yield (5.03 g per plot). In addition, under drought stress conditions, Amir cultivar had early flowering, maximum root dry weight and length, highest activity of catalase and peroxidase enzymes, and the highest seed yield per plot (1.67 g).

Conclusion: Generally, Amir cultivar had more seed yield due to having a suitable root system and superior agronomic characteristics and was selected as the superior genotype.

Cite this article: Jabbari, H., Gholam Hosseini, M., Valipour, M. B., Nazari, M. R., Omidi, A. H., & Tashakori Meymand, H. (2023). Investigate the effect of drought stress on root and shoot characteristics of safflower genotypes (*Carthamus tinctorius* L.). *Journal of Crops Improvement*, 25 (3), 557-573.
DOI: https://doi.org/10.22059/jci.2023.351005.2760

© The Authors.
Publisher: University of Tehran Press.
DOI: https://doi.org/10.22059/jci.2023.351005.2760

انتشارات دانشگاه تهران

به زراعی کشاورزی

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

شاپا الکترونیکی: ۲۳۴۵-۶۹۵۷

ارزیابی اثر تنش خشکی بر ویژگی‌های ریشه و اندام هوایی ژنوتیپ‌های گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.)

حمید جبّاری[۱]✉ | مجید غلامحسینی[۲] | محمدباقر ولی‌پور[۳] | محمدرضا نظری[۴] | امیرحسن امیدی[۵] | حبیب تشکری میمند[۶]

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

۲. مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. رایانامه: m.gholamhoseini@areeo.ac.ir

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

۴. مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. رایانامه: mrnazari@spii.ir

۵. مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. رایانامه: ah.omidi@areeo.ac.ir

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

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۲۱
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۳/۲۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۹
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۶/۲۹

کلیدواژه‌ها:
ارقام
خصوصیات فیزیولوژیک
شاخص سبزینگی
قطر ریشه
گل‌دهی
محتوای نسبی آب برگ

چکیده

هدف: این پژوهش به‌منظور تأثیر رژیم‌های آبیاری بر صفات مورفولوژیک ریشه و اندام هوایی ژنوتیپ‌های گلرنگ انجام شد.

روش پژوهش: این آزمایش با استفاده از لوله‌های پلیکا (پی‌وی‌سی) در مزرعه تحقیقاتی مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج در سال زراعی ۹۹-۱۳۹۸ انجام شد. آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. تیمارهای موردبررسی شامل رژیم آبیاری در دو سطح آبیاری کامل (شاهد) و تنش خشکی (به‌ترتیب آبیاری پس از تخلیه ۴۰ و ۸۰ درصد رطوبت قابل استفاده در خاک) و ژنوتیپ‌های مختلف گلرنگ شامل توده‌های محلی ورامین، همند (آبسرد)، ژنوتیپ قزاقستانی و ارقام امیر، گلدشت و پرنیان بودند.

یافته‌ها: نتایج نشان داد در شرایط تنش خشکی، طول و قطر ریشه به‌ترتیب به میزان ۲۸/۶ و ۱۳/۶ درصد افزایش و صفات وزن خشک ریشه، محتوای نسبی آب برگ، تعداد غوزه، تعداد دانه در بوته و عملکرد دانه در واحد آزمایشی به‌ترتیب ۲۳/۶، ۱۵/۲، ۲۵/۴، ۶۳/۳ و ۷۴/۹ درصد کاهش یافت. در شرایط آبیاری کامل، رقم امیر با برخورداری از سیستم ریشه‌ای مناسب (وزن خشک ریشه ۷/۷ گرم و طول ریشه ۷۱ سانتی‌متر) و حداکثر تعداد دانه از بیش‌ترین عملکرد دانه در واحد آزمایشی (۵/۰۳ گرم در بوته) برخوردار بود. رقم امیر در شرایط تنش خشکی با گل‌دهی زودهنگام، وزن خشک و طول ریشه زیاد، برخورداری از بیش‌ترین فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز، بیش‌ترین عملکرد دانه در واحد آزمایشی (۱/۶۷ گرم در بوته) را دارا بود.

نتیجه‌گیری: به‌طور کلی، رقم امیر به‌دلیل برخورداری از سیستم ریشه‌ای مناسب و ویژگی‌های برتر زراعی، عملکرد دانه بیش‌تری داشت و ژنوتیپ برتر بود.

استناد: جبّاری، حمید؛ غلامحسینی، مجید ؛ ولی‌پور، محمدباقر؛ نظری، محمدرضا؛ امیدی، امیرحسن؛ و تشکری میمند، حبیب (۱۴۰۲). ارزیابی اثر تنش خشکی بر ویژگی‌های ریشه و اندام هوایی ژنوتیپ‌های گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.). *به‌زراعی کشاورزی*، ۲۵ (۳)، ۵۵۷-۵۷۳.

DOI: https://doi.org/10.22059/jci.2023.351005.2760

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

CC BY NC

۱. مقدمه

تغییرات آب‌وهوایی ناشی از گرمایش کره زمین با کاهش میزان ریزش‌های جوی و افزایش تبخیر و تعرق در مناطق خشک و نیمه‌خشک سبب کاهش چشم‌گیر میزان آب در دسترس شده و تولیدات کشاورزی را با محدودیت جدی روبه‌رو می‌کند (Corwin, 2021). بر این اساس، خشکی یکی از مهم‌ترین تنش‌های محیطی است که با تغییر فرایندهای فیزیولوژیک و بیوشیمیایی بر عملکرد بسیاری از محصولات تأثیر می‌گذارد (Manvelian *et al*., 2021). گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.) یکی از مهم‌ترین گیاهان دانه روغنی و از خانواده Asteraceae، گیاهی است خودگشن که بومی مناطقی از آسیا تا آفریقا است (Singh & Nimbkar, 2007). بخش اعظم اراضی ایران در نواحی خشک و نیمه‌خشک واقع شده است و گیاه گلرنگ تحمل نسبی خوبی را در برابر تنش خشکی از خود نشان می‌دهد که همین موضوع موجب اقبال کشاورزان به این گیاه شده است (Omidi, 2012). با این‌حال، تنش خشکی مهم‌ترین تنش غیرزیستی است که تولید گلرنگ را محدود می‌سازد (Chavoushi *et al*., 2019). ازآنجاکه گلرنگ دارای ریشه‌های عمیق و قوی‌تری نسبت به سایر گیاهان است، می‌تواند به‌طور مؤثر از ذخایر رطوبت باقی‌مانده در خاک تا عمق ۳ متر استفاده کند (Hussain *et al*., 2016). اگرچه گلرنگ به‌دلیل داشتن ریشه‌های عمیق و توانایی بالا در جذب رطوبت از لایه‌های عمیق خاک، به‌عنوان گیاهی متحمل به خشکی شناخته می‌شود، اما پس از مرحله روزت نسبت به خشکی حساس‌تر می‌شود و بیش‌ترین حساسیت به کمبود آب را از مرحله تشکیل گل‌آذین تا اوایل مرحله پرشدن دانه نشان می‌دهد (Rahmani *et al*., 2019). برای فهم بیش‌تر سازوکارهای تحمل به خشکی و دستیابی به ژرم‌پلاسم در برنامه‌های اصلاحی، شناسایی صفات مورفوفیزیولوژیک مرتبط به‌ویژه صفات ریشه ضروری است (Gholamhoseini *et al*., 2021).

۲. پیشینه پژوهش

پژوهش‌هایی روی ویژگی‌های سیستم ریشه‌ای گونه‌های گیاهان زراعی انجام گرفته است، اما به‌دلیل مشکلات مرتبط با اندازه‌گیری سیستم‌های ریشه در مقادیر و مراحل مختلف (به‌غیر از مرحله گیاهچه‌ای)، دانش مربوط به این بررسی‌ها هنوز در مرحله ابتدایی توسعه می‌باشد (Bengough *et al*., 2011). باید توجه داشت که به‌ویژه در شرایط تنش خشکی، ریشه‌ها نقش مستقیم و آشکاری در مدیریت تأمین آب از طریق عمق ریشه‌زایی و تعداد ریشه‌ها در یک لایه خاص دارند و مطالعه مستقیم آن‌ها از ارزش بسیاری برخوردار است (Wasaya *et al*., 2018). با توجه به واکنش متفاوت ارقام گیاهی در برابر تنش‌های محیطی، بررسی صفات مرتبط با ریشه به‌منظور شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی اهمیت بالایی دارد (Rousseau *et al*., 2015).

بیش‌تر اوقات با افزایش شدت خشکی، نسبت ریشه به اندام‌های هوایی در گیاه گلرنگ افزایش می‌یابد و ارقام متحمل به خشکی، دارای تنوع بسیار زیاد از نظر سیستم ریشه‌ای هستند و نقش خصوصیات ریشه از قبیل قطر ریشه، عمق و پراکندگی ریشه در انتخاب رقم‌های متحمل به خشکی به اثبات رسیده است (Jabbari, 2021). در بررسی بهبود تحمل به خشکی در گیاه گلرنگ در مرحله رشد رویشی گزارش شده است که تنش خشکی سبب افزایش وزن ماده خشک و طول ریشه گیاه گلرنگ می‌شود (Chavoushi *et al*., 2019). در یک مطالعه گزارش شد که اعمال تنش خشکی تأثیر معنی‌داری بر کلیه ویژگی‌های مورفولوژی ریشه دو رقم کلزا دارد (Wu *et al*., 2017). در آزمایش دیگری تنش خشکی اثر معنی‌داری بر طول ریشه دو رقم گلرنگ در تیمارهای آبیاری براساس ۵۰ و ۲۵ درصد رطوبت قابل‌جذب داشت و سبب افزایش طول ریشه نسبت به تیمار شاهد شد. این افزایش در رقمی که ریشه‌های عمیق و ضخیم داشت،

بیش‌تر بود. در واقع، ویژگی‌های ریشه، به‌ویژه طول ریشه برای گیاه مهم است زیرا با بهره‌برداری مناسب از آب موجود در اعماق خاک سبب توسعه و استقرار بهتر اندام هوایی می‌شود (Hojati *et al*., 2011).

در بررسی رابطه سیستم ریشه‌ای با روابط آبی گیاه کلزا در شرایط تنش خشکی در یک آزمایش گلدانی نتیجه گرفته شد که نقش خصوصیات مورفولوژی ریشه در افزایش تحمل به خشکی در گیاه بسیار پررنگ است و یک سیستم ریشه‌ای کارآمد به‌همراه هدایت روزنه‌ای بالا، دوام سطح برگ زیاد و تولید اجزای عملکرد زیاد بیش‌ترین نقش را در پایداری عملکرد دانه در شرایط تنش خشکی دارد (Jabbari *et al*., 2016). هم‌چنین در بررسی توان تحمل به تنش خشکی در ژنوتیپ‌های مختلف گلرنگ مشخص شده است که محتوای نسبی آب برگ در ژنوتیپ‌های متحمل بصورت معنی‌داری بالاتر بود (Achhale, 2016). هم‌چنین در ژنوتیپ‌های متحمل تغییرات محتوای نسبی آب برگ طی تنش خشکی نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها کم‌تر بوده و این ژنوتیپ‌ها پایداری عملکرد بالاتری دارند (Pasban Eslam, 2011). از سوی دیگر، روغن دانه گلرنگ به‌عنوان محصول نهایی کشت این گیاه علاوه بر کمیت از نظر کیفیت نیز تحت تأثیر تنش خشکی قرار دارد. نتایج یک آزمایش در این زمینه نشان داد که که ژنوتیپ‌های مختلف گلرنگ از نظر اجزای عملکرد، زیست‌توده و درصد روغن در شرایط کمبود آب با هم تفاوت دارند و کاهش عملکرد گلرنگ در شرایط کمبود آب به‌دلیل تولید کم زیست‌توده و کاهش محسوس وزن هزاردانه و تعداد دانه در بوته مرتبط است (Joshan *et al*., 2019).

قرارگرفتن ریشه در زیر خاک، موجب کم‌رنگشدن نقش حیاتی این بخش از گیاه در پژوهش‌های علمی شده است، اما نقش‌ها و کارکردهای فراوان ریشه موجب شده تا این اندام موضوع مطالعات گردد. لذا تعیین تحمل نسبی به خشکی در گیاه گلرنگ به‌ویژه از طریق مطالعه صفات ریشه در ارقام مختلف آن، از اهمیت زیادی برخوردار است. از این‌رو، در این پژوهش میزان تحمل به خشکی در شش ژنوتیپ گلرنگ (توده‌های محلی و ارقام تجاری ایرانی و خارجی) با مطالعه خصوصیات مرتبط با ریشه و صفات مورفوفیزیولوژیک اندام هوایی موردمطالعه قرار گرفته است.

۳. روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش به‌منظور تأثیر رژیم‌های آبیاری بر صفات ریشه و اندام هوایی ژنوتیپ‌های گلرنگ انجام شد. این بررسی به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه پژوهشی مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر واقع در جاده محمدشهر کرج (استان البرز) با طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۶ دقیقه شرقی، عرض ۳۵ درجه و ۴۹ دقیقه شمالی و ارتفاع ۱۳۲۱ متر از سطح دریا در فصل زراعی ۱۳۹۹–۱۳۹۸ اجرا شد. این منطقه براساس آمار آب‌وهوایی و منحنی آمبروترمیک به‌دلیل داشتن ۱۵۰ تا ۱۸۰ روز خشک، جزو مناطق آب‌وهوایی مدیترانه‌ای گرم و خشک و با داشتن زمستان سرد و مرطوب و تابستان گرم و خشک جزو رژیم رطوبتی خشک محسوب می‌شود. براساس اطلاعات ۳۰ ساله هواشناسی استان البرز، متوسط بارندگی منطقه ۲۴۳ میلی‌متر در سال است. بارندگی‌ها عمدتاً در اواخر پاییز و اوایل بهار رخ می‌دهد. میانگین حداکثر درجه حرارت سالانه در تیرماه، ۲۸ درجه سانتی‌گراد و میانگین حداقل درجه حرارت، یک درجه سانتی‌گراد در دی‌ماه اتفاق می‌افتد. متوسط درجه حرارت منطقه در یک دوره ۳۰ ساله برابر ۱۳/۵ درجه سانتی‌گراد و درجه حرارت خاک، ۱۴/۵ درجه سانتی‌گراد است.

در این پژوهش رقم تازه معرفی شده امیر که حاصل تلاقی ارقام پدیده× گلدشت است به‌همراه توده محلی ورامین، توده محلی همند آبسرد (دماوند) و اکسشن قزاقستانی با دو ژنوتیپ ایرانی پرنیان و گلدشت (به‌عنوان شاهد) در دو رژیم آبیاری شامل آبیاری کامل و کم‌آبیاری (تنش خشکی) از نظر تحمل به تنش خشکی و سیستم ریشه‌ای مورد مقایسه قرار گرفتند. تیپ‌های

خودرو و وحشی موردبررسی شامل توده‌های محلی ورامین و همند بودند که به‌ترتیب از اطراف ورامین و ۵۰ کیلومتری شرق تهران (منطقه همند آبسرد) جمع‌آوری شده بودند (USDA Agricultural Research Service, 2019).

جدول ۱. نام، مشخصات و مبدأ ژنوتیپ‌های گلرنگ مورد مطالعه

ردیف	ژنوتیپ	مبدأ	تیپ رشدی	رنگ گل	وضعیت خار	توضیحات
۱	امیر	ایران	بهاره (زودرس)	قرمز	بدون خار	غوزه درشت با وزن هزاردانه ۴۵ گرم
۲	توده محلی ورامین	ایران	بهاره (میان‌رس)	نارنجی	کم خار	وزن هزاردانه ۳۸ تا ۴۳ گرم با روغن دانه ۲۷ درصد
۳	توده محلی همند آبسرد (دماوند)	ایران	بهاره (میان‌رس)	نارنجی	بدون خار	وزن هزاردانه ۲۷ تا ۳۴ گرم با روغن دانه ۳۰ درصد
۴	قزاقستانی	قزاقستان	بهاره (زودرس)	نارنجی	خاردار	توده محلی متحمل به سرما
۵	گلدشت	ایران	بهاره (زودرس)	قرمز	بدون خار	وزن هزاردانه ۴۰ گرم
۶	پرنیان	ایران	بهاره (زودرس)	سفید	بدون خار	متحمل به سرما با وزن هزاردانه ۴۲ گرم

در این آزمایش ابتدا شاخه‌های شش متری لوله‌های پلیکای (پی‌وی‌سی) تهیه شد و در ابعاد طولی ۱/۵ متر برش خورد. سپس به‌صورت طولی به دو نیم تقسیم شدند و برای تسهیل ارزیابی نهایی، با استفاده از بست‌های پلاستیکی و 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 داخل آن لوله‌های پلیکای با قطر ۲۵ سانتی‌متر به‌صورت عمودی جاگذاری و با خاک پر شد. ترکیب خاک استفاده‌شده به‌صورت دو واحد ماسه بادی، یک واحد خاک زراعی و یک واحد خاک برگ بود. زمان کشت در لوله‌های پلیکا ۱۵ اسفندماه بود و آبیاری اول بلافاصله بعد از کاشت انجام شد. شکل (۱) نمایی کلی از نحوه اجرای آزمایش را نشان می‌دهد. هر واحد آزمایشی شامل دو لوله و در هر لوله سه بذر کاشته شد که پس از سبزشدن و استقرار گیاهچه، تنها یک بوته در هر لوله حفظ شد.

شکل ۱. نمایی از نحوه اجرای آزمایش با استفاده از لوله‌های پلیکا (پی‌وی‌سی)

برای کنترل رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه از دستگاه T.D.R[1] (مدل ۱x۶۰۵۰، کشور آمریکا) در لوله‌ها استفاده شد و زمان‌بندی آبیاری واحدهای آزمایشی براساس روش تغییرات درصد حجمی رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه به‌صورت آبیاری قطره‌ای انجام شد (شکل ۱). در این روش هنگامی‌که درصد رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه از حد مشخصی کم‌تر شود، آبیاری انجام شد. در این آزمایش آبیاری زمانی صورت گرفت که ۴۰ و ۸۰ درصد رطوبت قابل استفاده در عمق ۳۰ سانتی‌متری خاک (با استفاده از سنسور میله ۳۰ سانتی‌متری دستگاه T.D.R) به‌ترتیب در رژیم آبیاری کامل و تنش خشکی، به‌وسیله گیاه و یا تبخیر از سطح خاک تخلیه شد. تعیین مقدار رطوبت قابل استفاده نیز از تفاوت درصد حجمی رطوبت (در عمق توسعه ریشه) در نقطه ظرفیت زراعی (FC)[2] از درصد حجمی رطوبت در نقطه پژمردگی دائمی (PWP)[3] به‌دست آمد. زمان اعمال تنش خشکی از مرحله شش برگی به بعد بود.

در مرحله چهاربرگی کود محلول حاوی مقادیر زیاد فسفر (۱۰-۵۲-۱۰) و کود محلول حاوی مقادیر زیاد پتاس (۳۶-۱۲-۱۲) به میزان ۱ لیتر در هکتار محلول‌پاشی انجام شد. هم‌چنین از مرحله رشد سریع ساقه تا تکمه‌دهی نیز سه مرتبه محلول‌پاشی کود سرک اوره با غلظت پنج در هزار صورت گرفت.

در طی دوره رشد، مرحله نموی آغاز گل‌دهی در هر ژنوتیپ و در هر تیمار یادداشت برداری شد. زمان برداشت گیاهان در ۱ مردادماه بود (زمان رسیدگی برای ژنوتیپ‌های موردمطالعه متفاوت و از ۲۵ تا ۱ مردادماه متغیر بود) و نمونه‌برداری ریشه و اندام هوایی در این تاریخ انجام شد. در هنگام برداشت، لوله‌ها از زمین بیرون آورده شد و بوته‌ها همراه با ریشه کامل از خاک جدا و صفات ریشه‌ای شامل قطر ریشه اصلی در محدوده ۵ سانتی‌متری پایین طوقه (با استفاده از کولیس)، طول ریشه (با استفاده از خط‌کش)، وزن خشک ریشه (از طریق توزین) و خصوصیات اندام هوایی (تعداد شاخه فرعی، ارتفاع بوته، عملکرد و اجزای عملکرد) در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. هم‌چنین به‌منظور ارزیابی شاخص سبزینگی (SPAD) در مرحله پرشدن دانه از دستگاه کلروفیل‌متر دستی (مدل MINOLTA-502، کشور ژاپن) برای متوسط پنج نقطه از سه برگ جوان و توسعه یافته استفاده شد.

محتوای نسبی آب برگ در مرحله پرشدن دانه اندازه‌گیری شد. برای این منظور در ساعت هفت صبح سه برگ جوان و توسعه یافته از بالای پوشش گیاهی از هر کرت برداشت گردید و محتوای نسبی آب برگ با استفاده از معادله (۱) محاسبه گردید (Jabbari, 2021).

$$RWC\ (\%) = (FW - DW)\ /\ (TW - DW) \times ۱۰۰$$ رابطهٔ ۱)

در این رابطه، RWC: محتوای نسبی آب برگ، FW: وزن تر برگ، TW: وزن آماس برگ و DW: وزن خشک برگ است.

در مرحله پرشدن دانه، اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان کاتالاز و پراکسیداز با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل Cary ۱۰۰، کشور هلند) به‌ترتیب در طول موج‌های ۲۴۰ و ۴۷۰ نانومتر اندازه‌گیری شد (Aebi, 1983; Chance & Maehly, 1955). ارزیابی فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز، محتوای نسبی آب برگ و شاخص سبزینگی (SPAD) در تیمار شاهد ۱۲ ساعت پس از آبیاری و در تیمار تنش خشکی قبل از انجام آبیاری بود تا دو تیمار آبیاری از نظر وضعیت رطوبتی خاک متفاوت باشند و شرایط تنش خشکی به‌خوبی اعمال شده باشد.

قبل از انجام تجزیه واریانس، آزمون نرمال‌بودن داده‌های آزمایشی انجام شد. تجزیه داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار

1. Time-Domain Reflectometry, Trase System Soilmoisture Equipment Corp
2. Fiel Capacity
3. Permanent Wilting Point

آماری SAS (نسخه ۹/۱) انجام شد. برای مقایسه میانگین‌های اثرات اصلی از آزمون LSD[1] در سطح پنج درصد و برای مقایسه میانگین اثرات متقابل از روش برش‌دهی استفاده شد. نمودار ماتریکس همبستگی ساده[2] بین صفات در دو شرایط بدون تنش (شاهد) و تنش خشکی به‌صورت جداگانه با استفاده از نرم‌افزار R (نسخه ۱. ۵. ۳) رسم شد.

۴. یافته‌های پژوهش

نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که تأثیر تیمار آبیاری بر تمامی صفات موردمطالعه نظیر تعداد روز تا گل‌دهی، وزن خشک، طول و قطر ریشه، ارتفاع بوته، تعداد غوزه، تعداد شاخه فرعی، فعالیت آنزیم کاتالاز و پراکسیداز، محتوای نسبی آب برگ، شاخص سبزینگی (SPAD)، تعداد دانه در بوته و عملکرد دانه در واحد آزمایشی در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). ژنوتیپ‌های موردبررسی تفاوت معنی‌داری از نظر کلیه صفات موردبررسی نظیر تعداد روز تا گل‌دهی، وزن خشک، طول و قطر ریشه، ارتفاع بوته، تعداد غوزه، تعداد شاخه، فعالیت آنزیم کاتالاز و پراکسیداز، محتوای نسبی آب برگ، شاخص سبزینگی (SPAD)، تعداد دانه در بوته و عملکرد دانه در واحد آزمایشی داشتند (جدول ۲). اثر متقابل تیمارهای آبیاری× ژنوتیپ بر تعداد روز تا گل‌دهی، وزن خشک ریشه، طول ریشه، ارتفاع بوته، فعالیت آنزیم کاتالاز و پراکسیداز، محتوای نسبی آب برگ، شاخص سبزینگی (SPAD)، تعداد دانه در بوته و عملکرد دانه در واحد آزمایشی در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲).

جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس برخی از صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک در شش رقم گلرنگ در دو سطح آبیاری

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات						
		تعداد روز تا گل‌دهی	وزن خشک ریشه	طول ریشه	قطر ریشه	ارتفاع بوته	تعداد غوزه در بوته	تعداد شاخه فرعی
تکرار	۲	۱۲/۱۷**	۰/۱۶**	۱۸/۳*	۰/۳ns	۲۲/۹ns	۶/۳۶**	۲/۷۷*
آبیاری	۱	۶۵/۱۳**	۱۵/۲۳**	۲۷۸۰/۸**	۷/۱**	۱۷۸۲/۲**	۱۷/۳۶**	۱۸/۷۷**
ژنوتیپ	۵	۱۳/۲۲**	۱۶/۲۲**	۹۷۷/۴**	۶/۷**	۱۱۲۳/۲**	۸/۸۲**	۳/۷۷**
آبیاری × ژنوتیپ	۵	۱۱/۲۰**	۰/۵۴**	۳۲۱/۴**	۱/۳ns	۱۴۴/۵**	۰/۰۲ns	۰/۱۱ns
خطا	۲۲	۱/۲۵	۰/۰۲	۴/۶	۰/۷	۱۸/۳	۰/۱۴	۰/۵۳
ضریب تغییرات (درصد)	–	۱/۲۸	۲/۸	۳/۱	۱۲/۰	۷/۰	۸/۰	۹/۰

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات					
		فعالیت آنزیم کاتالاز	فعالیت آنزیم پراکسیداز	محتوای نسبی آب برگ (RWC)	شاخص سبزینگی (SPAD)	تعداد دانه در بوته	عملکرد دانه در واحد آزمایشی
تکرار	۲	۳/۱۷**	۱/۰۹ns	۸/۹**	۸/۰**	۵/۴*	۲/۰۳**
آبیاری	۱	۶۶/۵۸**	۱۶/۴۰**	۱۲۷۵/۶**	۸۸۱/۱**	۵۱۳/۷**	۴۵/۲۴**
ژنوتیپ	۵	۱۳/۸۴**	۱۱/۲۴**	۶۷/۱**	۱۳/۶**	۱۶/۹**	۵/۰**
آبیاری× ژنوتیپ	۵	۱۳/۶۷**	۷/۴۸**	۱۰/۱**	۲۲/۸**	۴/۷**	۱/۱۷**
خطا	۲۲	۰/۰۵	۰/۸۶	۱/۲۲	۱/۰	۱/۰	۰/۱۱
ضریب تغییرات (درصد)	–	۶/۶	۱۶/۹	۱/۵	۱/۶	۱۲/۴	۱۸/۱

**، * و ns: معنی‌داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد و نبود اختلاف معنی‌دار.

اعمال تنش خشکی سبب کاهش ۲۵/۴ و ۳۱/۲ درصدی به‌ترتیب تعداد غوزه و تعداد شاخه فرعی و افزایش ۱۳/۶ درصدی قطر ریشه در مقایسه با تیمار شاهد (عدم تنش خشکی) شد (جدول ۳). در بین شش ژنوتیپ گلرنگ موردبررسی،

1. Least Significant Difference
2. Correlation matrix plot

رقم امیر از بیش‌ترین قطر ریشه برخوردار بود (جدول ۳). از نظر تعداد غوزه نیز رقم امیر به‌طور معنی‌داری برتر از سایر ژنوتیپ‌ها بود و پس از آن، ژنوتیپ‌های قزاقستانی، گلدشت و پرنیان در یک گروه آماری قرار داشتند (جدول ۳). هم‌چنین رقم امیر از بیش‌ترین تعداد شاخه فرعی برخوردار بود (جدول ۳). با این وجود، رقم امیر از نظر تعداد شاخه فرعی تفاوت معنی‌داری با ژنوتیپ‌های قزاقستانی، گلدشت و پرنیان نداشت (جدول ۳).

جدول ۳. مقایسه میانگین‌های صفات قطر ریشه، تعداد شاخه فرعی و تعداد غوزه در بوته در تیمارهای مختلف در گلرنگ

تیمارها	قطر ریشه (میلی‌متر)	تعداد شاخه فرعی	تعداد غوزه در بوته
تیمار آبیاری			
شاهد	۶/۶ b	۴/۸ a	۵/۵ a
تنش خشکی	۷/۵ a	۳/۳ b	۴/۱ b
ژنوتیپ			
توده محلی همند (آبسرد)	۵/۸ c	۳/۱۶ b	۳/۳ c
امیر	۸/۲ a	۵/۱۶ a	۶/۳ a
توده محلی ورامین	۵/۹ c	۳/۱۶ b	۳/۳ c
پرنیان	۷/۰ b	۴/۳۳ a	۵/۱ b
گلدشت	۷/۰ b	۴/۳۳ a	۵/۳ b
قزاقستانی	۸/۲ a	۴/۵۰ a	۵/۳ b

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون فاقد اختلاف معنی‌دار آماری در سطح احتمال پنج درصد از نظر آزمون آماری حداقل اختلاف معنی‌دار هستند.

نتایج بررسی مقایسه میانگین اثرات متقابل آبیاری× ژنوتیپ در جدول (۴) نشان می‌دهد که در شرایط شاهد، دو توده محلی همند و ورامین و در شرایط تنش خشکی، توده‌های محلی همند و ورامین و رقم پرنیان بیش‌ترین تعداد روز تا آغاز گل‌دهی را دارا بودند. در مقابل، کم‌ترین تعداد روز تا آغاز گل‌دهی در شرایط شاهد در رقم امیر و در شرایط تنش خشکی در ژنوتیپ قزاقستانی مشاهده شد (جدول ۴). در شرایط تنش خشکی واکنش ژنوتیپ‌های گلرنگ از نظر طول ریشه کاملاً متفاوت بود و با اعمال تنش خشکی طول ریشه در برخی ژنوتیپ‌ها کاهش و در برخی افزایش یافت (جدول ۴). به‌عنوان مثال، میانگین طول ریشه در توده محلی همند با اعمال تنش خشکی ۶ درصد کاهش یافت، درحالی‌که میانگین طول ریشه در ژنوتیپ‌های امیر، ورامین، پرنیان، گلدشت و قزاقستانی در شرایط تنش خشکی به‌ترتیب ۴۰، ۳، ۳۸، ۴۱ و ۴۸ درصد افزایش یافت (جدول ۴). در مقابل، وزن خشک ریشه در تمامی ژنوتیپ‌های مورد مطالعه با اعمال تنش خشکی کاهش یافت ولی میزان کاهش در هر ژنوتیپ کاملاً متفاوت بود، به‌طوری‌که میزان کاهش وزن خشک ریشه در ژنوتیپ‌های امیر و قزاقستانی به‌ترتیب ۱۷ و ۱۶ درصد و در ژنوتیپ پرنیان ۳۶ درصد بود (جدول ۴).

در آزمایش حاضر و در تیمار آبیاری کامل، رقم امیر از نظر وزن خشک ریشه و طول ریشه برتر از سایر ژنوتیپ‌ها بود. هرچند این برتری در تیمار تنش خشکی نیز مشاهده شد و رقم امیر از نظر خصوصیات ریشه به‌همراه ژنوتیپ قزاقستانی برتر از سایر ژنوتیپ‌ها بودند (جدول ۴). در مقابل میانگین وزن خشک و طول ریشه در هر دو تیمار آبیاری در توده محلی ورامین و همند به‌طور معنی‌داری کم‌تر از سایر ژنوتیپ‌ها بود (جدول ۴). به‌عنوان مثال، وزن خشک ریشه در رقم امیر بیش از دو برابر میانگین وزن خشک در توده محلی همند و ورامین بود. هم‌چنین میانگین طول ریشه در رقم امیر در مقایسه میانگین طول ریشه در توده محلی همند و ورامین به‌ترتیب ۱۴/۸ و ۱۶/۸ سانتی‌متر بیش‌تر بود (جدول ۴). تفاوت رشد ریشه در دو شرایط تنش خشکی و بدون تنش در دو ژنوتیپ قزاقستانی و گلدشت در شکل (۲) نشان داده شده است.

جدول ۴. مقایسه میانگین‌های اثر متقابل آبیاری و ژنوتیپ در گلرنگ

تیمار آبیاری	تیمارها / ژنوتیپ	تعداد روز تا گل‌دهی (روز)	وزن خشک ریشه (گرم)	طول ریشه (سانتی‌متر)	ارتفاع بوته (سانتی‌متر)	فعالیت آنزیم کاتالاز (میکرومول H_2O_2/ دقیقه/ میلی‌گرم پروتئین)	فعالیت آنزیم پراکسیداز (میکرومول H_2O_2/ دقیقه/ میلی‌گرم پروتئین)
شاهد	توده محلی همند (آبسرد)	۹۱/۶ a	۳/۳۳ e	۵۶/۴ e	۵۷/۲ e	۱/۸۷ e	۴/۲۱ d
	امیر	۸۵/۳ c	۷/۶۶ a	۷۱/۲ a	۶۴/۰ d	۲/۰۸ c	۵/۰۸ c
	توده محلی ورامین	۹۱/۶ a	۳/۲۲ f	۵۴/۴ f	۵۶/۳ f	۱/۹۱ d	۴/۱۰ e
	پرنیان	۸۸/۶ b	۶/۳۳ b	۶۱/۶ c	۷۶/۸ a	۲/۵۳ a	۵/۱۰ b
	گلدشت	۸۷/۳ b	۶/۲۶ d	۶۰/۹ d	۷۵/۲ c	۲/۵۳ a	۵/۱۰ b
	قزاقستانی	۸۸/۳ b	۶/۲۳ c	۶۴/۸ b	۷۵/۵ b	۲/۴۳ b	۵/۲۲ a
تنش خشکی	توده محلی همند (آبسرد)	۸۷/۰ a	۲/۶۲ e	۵۳/۰ c	۳۰/۸ b	۲/۶ d	۴/۹۰ c
	امیر	۸۵/۳ b	۶/۳۸ a	۹۹/۶ a	۵۹/۵ a	۱۰/۴ a	۱۰/۵۰ a
	توده محلی ورامین	۸۷/۰ a	۲/۴۱ e	۵۶/۰ c	۲۹/۷ b	۲/۸ d	۴/۷۰ cd
	پرنیان	۸۷/۰ a	۴/۰۶ d	۸۴/۷ b	۶۸/۲ a	۳/۴ c	۴/۲۰ d
	گلدشت	۸۵/۳ b	۴/۵۱ c	۸۵/۹ b	۶۴/۸ a	۳/۷ c	۴/۹۰ c
	قزاقستانی	۸۳/۶ c	۵/۲۱ b	۹۵/۶ a	۶۷/۷ a	۶/۴ b	۷/۶۰ b

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون فاقد اختلاف معنی‌دار آماری در سطح احتمال پنج درصد از نظر آزمون آماری حداقل اختلاف معنی‌دار هستند.

شکل ۲. تفاوت رشد ریشه در دو ژنوتیپ گلرنگ (قزاقستانی و گلدشت) در شرایط تنش خشکی و بدون تنش (شاهد)

در شرایط تنش خشکی فعالیت آنزیم کاتالاز در تمامی ژنوتیپ‌های گلرنگ افزایش یافت اما میزان افزایش در رقم امیر بسیار زیاد و در رقم پرنیان و توده محلی همند و ورامین کم‌تر بود (جدول ۴). در مقابل، واکنش ژنوتیپ‌ها به تنش خشکی از نظر فعالیت آنزیم پراکسیداز متفاوت بود، برای مثال در ارقام پرنیان و گلدشت فعالیت آنزیم پراکسیداز با اعمال تنش خشکی کاهش یافت، درحالی‌که در سایر ژنوتیپ‌ها میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز بیش‌تر شد (جدول ۴). براین اساس، در تیمار شاهد، ارقام گلدشت و پرنیان و در تیمار تنش خشکی رقم امیر بیش‌ترین فعالیت آنزیم کاتالاز را داشتند (جدول ۴). هم‌چنین در تیمار شاهد، بیش‌ترین فعالیت آنزیم پراکسیداز در رقم قزاقستانی و در تیمار تنش خشکی در رقم امیر مشاهده شد (جدول ۴).

در این مطالعه، محتوای نسبی آب برگ در شش ژنوتیپ گلرنگ با اعمال تنش خشکی کاهش معنی‌داری یافت (جدول ۵). با این وجود، عکس‌العمل ژنوتیپ‌ها از نظر محتوای نسبی آب برگ در دو سطح تیمار رطوبتی خاک متفاوت بود. در تیمار شاهد رقم امیر با ۸۰/۸ درصد و در تیمار تنش خشکی ژنوتیپ قزاقستانی و رقم امیر به‌ترتیب با ۷۰/۹ و ۷۰/۷ درصد بیش‌ترین محتوای نسبی آب برگ را در بین ژنوتیپ‌ها داشتند (جدول ۵).

در تیمار شاهد، ژنوتیپ‌های موردبررسی تفاوت محسوسی از نظر شاخص سبزینگی (SPAD) نداشتند و تفاوت بین بیش‌ترین و کم‌ترین مقادیر شاخص سبزینگی در بین ژنوتیپ‌ها ۱/۷ واحد بود، درحالی‌که در شرایط تنش خشکی تفاوت در بین ژنوتیپ‌ها از نظر مقادیر شاخص سبزینگی بسیار چشم‌گیر و در حدود ۹/۵ واحد بود. با این‌حال، بالاترین شاخص سبزینگی در تیمار شاهد، در ژنوتیپ قزاقستانی و در تیمار تنش خشکی در توده محلی همند قرائت شد (جدول ۵). این در حالی است که کم‌ترین شاخص سبزینگی در شرایط تنش خشکی در رقم امیر به میزان ۶۰/۷ مشاهده شد (جدول ۵).

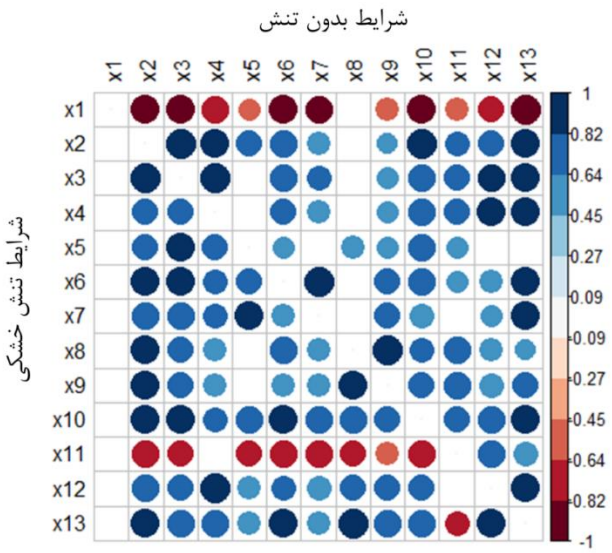
در این آزمایش تعداد غوزه و به‌ویژه تعداد دانه در غوزه در ژنوتیپ‌های گلرنگ بسیار محدود بود و در هر غوزه تنها یک یا دو دانه تشکیل شده بود (جدول‌های ۳ و ۵). با این وجود، رقم امیر در تیمار شاهد و ژنوتیپ‌های قزاقستانی و امیر در تیمار تنش خشکی از بیش‌ترین تعداد دانه در بوته برخوردار بودند (جدول ۵). واکنش ژنوتیپ‌های گلرنگ موردمطالعه، از نظر عملکرد دانه در واحد آزمایشی (تک‌بوته) در دو سطح تیمار رطوبتی خاک متفاوت بود. در هر دو تیمار رطوبتی، ژنوتیپ‌های توده محلی ورامین و همند کم‌ترین عملکرد دانه را داشتند (جدول‌های ۴ و ۵).

نتایج ضرایب همبستگی به‌صورت پلات همبستگی پیوسته برای شرایط بدون تنش (شاهد) و تنش خشکی ارائه شد (شکل ۳). داخل پلات فقط ضرایب معنی‌دار نمایش داده شده است و از آبی پررنگ تا قرمز پررنگ به‌ترتیب ضرایب مثبت یک تا منفی یک نشان داده شده است (شکل ۳). بر این اساس در شرایط شاهد (بدون تنش) تعداد روز تا گل‌دهی همبستگی منفی و معنی‌داری با اکثر صفات موردمطالعه به‌ویژه عملکرد دانه داشت. هم‌چنین عملکر دانه همبستگی مثبت و زیادی با صفات ریشه (وزن خشک، طول و قطر ریشه) داشت (شکل ۳). در مقابل در شرایط تنش خشکی هیچ همبستگی معنی‌داری بین تعداد روز تا گل‌دهی با سایر صفات مشاهده نشد، اما هم‌چنان صفات ریشه (وزن خشک، طول و قطر ریشه) همبستگی مثبت و معنی‌داری با اکثر صفات به‌ویژه محتوای نسبی آب برگ داشت (شکل ۳). هم‌چنین همبستگی مثبت و قابل‌ملاحظه‌ای بین فعالیت آنزیم کاتالاز و عملکرد دانه در شرایط تنش خشکی وجود داشت (شکل ۳). در شرایط تنش خشکی شاخص سبزینگی با اکثر صفات موردبررسی همبستگی منفی و معنی‌داری داشت درحالی‌که در شرایط بدون تنش همبستگی موجود مثبت بود (شکل ۳).

جدول ۵. مقایسه میانگین‌های اثر متقابل آبیاری و ژنوتیپ در گلرنگ

تیمارها		محتوای نسبی آب برگ (درصد)	شاخص سبزینگی	تعداد دانه در بوته	عملکرد دانه در واحد آزمایشی (تک‌بوته) (گرم)
تیمار آبیاری	ژنوتیپ				
شاهد	توده محلی همند (آبسرد)	۷۴/۶ e	۵۵/۷ e	۱۰/۶ d	۱/۶۰ d
	امیر	۸۰/۸ a	۵۶/۹ b	۱۴/۶ a	۵/۰۳ a
	توده محلی ورامین	۷۴/۰ f	۵۵/۵ f	۱۰/۶ d	۱/۶۰ d
	پرنیان	۷۹/۹ c	۵۶/۳ d	۱۱/۶ c	۳/۳۳ b
	گلدشت	۸۰/۶ b	۵۶/۴ c	۱۲/۶ b	۳/۶۰ b
	قزاقستانی	۷۸/۵ d	۵۷/۲ a	۱۱/۶ c	۲/۷۸ c
تنش خشکی	توده محلی همند (آبسرد)	۶۱/۶ c	۷۰/۲ a	۳/۰ b	۰/۲۳ c
	امیر	۷۰/۷ a	۶۰/۷ d	۶/۶ a	۱/۶۷ a
	توده محلی ورامین	۶۱/۷ c	۶۹/۳ ab	۲/۰ b	۰/۱۵ c
	پرنیان	۶۵/۸ b	۶۵/۰ c	۳/۳ b	۰/۵۶ bc
	گلدشت	۶۶/۳ b	۶۵/۲ c	۴/۰ b	۰/۶۴ b
	قزاقستانی	۷۰/۹ a	۶۶/۸ bc	۷/۶ a	۱/۲۴ a

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون فاقد اختلاف معنی‌دار آماری در سطح احتمال پنج درصد از نظر آزمون آماری حداقل اختلاف معنی‌دار هستند.



شکل ۳. ضرایب همبستگی ساده بین صفات اندازه‌گیری‌شده در ژنوتیپ‌های گلرنگ در رژیم‌های آبیاری کامل (مثلث بالایی) و تنش خشکی (مثلث پایینی).
X1: تعداد روز تا گل‌دهی، X2: وزن خشک ریشه، X3: طول ریشه، X4: قطر ریشه، X5: ارتفاع بوته، X6: تعداد غوزه در بوته، X7: تعداد شاخه فرعی، X8: فعالیت آنزیم کاتالاز، X9: فعالیت آنزیم پراکسیداز، X10: محتوای نسبی آب برگ، X11: شاخص سبزینگی، X12: تعداد دانه در بوته و X13: عملکرد دانه در واحد آزمایشی.
(فقط ضرایب همبستگی معنی‌دار با دو رنگ آبی و قرمز نشان داده شده‌اند و آبی پررنگ تا قرمز پررنگ به‌ترتیب نشان دهنده ضرایب مثبت یک تا منفی یک می‌باشند).

۵. بحث

براساس نتایج به‌دست‌آمده، رقم امیر و ژنوتیپ قزاقستانی و رقم گلدشت زودگل‌تر از سایر ژنوتیپ‌ها بودند. اعمال تنش خشکی سبب کاهش تعداد روز تا گل‌دهی در ژنوتیپ‌های گلرنگ به میزان ۲/۶ روز در مقایسه با تیمار شاهد شد (جدول ۳) و گل‌دهی زودهنگام در شرایط تنش خشکی به‌دلیل فرار از خشکی رخ داده بود.

نتایج صفات مرتبط با رشد ریشه در این آزمایش نشان داد که اثر متقابل ژنوتیپ و فراهمی آب تعیین‌کننده پاسخ ریشه می‌باشد (جدول ۴). تمامی ژنوتیپ‌هایی که در شرایط شاهد دارای رشد ریشه بالایی بودند، لزوماً در شرایط تنش خشکی قادر به حفظ مقادیر بالای رشد ریشه خود نبودند. برای مثال، رقم پرنیان در شرایط شاهد، دارای رشد ریشه بالایی بود، اما در شرایط تنش، دارای بالاترین میزان کاهش رشد ریشه در مقایسه با شاهد بودند (جدول ۴). با توجه به افزایش طول و قطر ریشه در شرایط تنش خشکی علت کاهش وزن خشک ریشه کاهش تولید ماده خشک و تخصیص آن به هر دو اندام هوایی و زمینی (ریشه) بوده است (جدول‌های ۳ و ۴). احتمالاً کاهش وزن خشک ریشه در ژنوتیپ‌های گلرنگ در شرایط تنش خشکی به اختصاص کربن تولیدشده به سایر مسیرهای متابولیک مؤثر در تخفیف اثر تنش مثل فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مرتبط بوده است که در این بررسی نیز با بروز تنش خشکی فعالیت دو آنزیم کاتالاز و پراکسیداز افزایش قابل ملاحظه‌ای نشان داد (جدول ۴). در مطالعه دیگری بیان شده است که در زمان شروع تنش خشکی، توسعه سطح برگ متوقف می‌شود، درحالی‌که جذب کربن هم‌چنان در حدود نزدیک به مقادیر عادی (بدون تنش) باقی می‌ماند. کربن اضافی تولیدشده ممکن است ذخیره شود و برای تنظیم اسمزی به‌کار رود (Palta *et al*., 2011).

در مطالعه مشابهی در ژنوتیپ‌های کنجد گزارش شده است تراکم طولی ریشه در تیمار آبیاری کامل و در لایه بالایی خاک (عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری) در مقایسه با تیمار تنش بیش‌تر بود و با اعمال تنش خشکی، عمق ریشه در تمامی ژنوتیپ‌ها به‌طور متوسط ۳۰ درصد افزایش یافت. در مقابل، وزن خشک ریشه در ارقام حساس و نیمه حساس به خشکی بین ۱۵ تا ۲۲ درصد کاهش و در ژنوتیپ‌های متحمل بین یک تا ۱۰ درصد افزایش یافت. هم‌چنین نتایج آن‌ها نشان داد ژنوتیپ‌هایی که از لحاظ ویژگی‌های ریشه از جمله عمق ریشه و طول ریشه در مقایسه با سایر ارقام برتر بود، دارای حداقل کاهش عملکرد در شرایط تنش می‌باشند (Gholamhoseini *et al*., 2021).

با توجه به واکنش رشدی متفاوت ریشه ژنوتیپ‌های گلرنگ، به‌نظر می‌رسد که تفاوت در طول ریشه در شرایط شاهد و تنش، ناشی از تنوع ژنتیکی در پاسخ رشدی ژنوتیپ‌های گلرنگ بوده است. هم‌چنین تفاوت بین ارقام از نظر طول دوره رشد بر وضعیت رشد ریشه نیز تأثیرگذار می‌باشد. تفاوت ژنتیکی در رشد ریشه گندم نان (Hosseinalipour *et al*., 2020)، کلزا (Jabbari *et al*., 2016) و گلرنگ (Salem *et al*., 2014) در واکنش به تنش خشکی قبلاً نیز گزارش شده است. به همین علت، استفاده از ویژگی‌های ریخت‌شناسی ریشه در راستای حفظ طول ریشه و در نتیجه حفظ جذب آب می‌تواند یکی از مهم‌ترین اهداف برنامه‌های به‌نژادی در شرایط تنش خشکی باشد.

تنش خشکی ارتفاع بوته ژنوتیپ‌های گلرنگ را کاهش داد که موید گزارش‌های برخی مطالعات دیگر است که کاهش پنج درصدی ارتفاع بوته پنج ژنوتیپ گلرنگ را در شرایط تنش خشکی گزارش کردند (Joshan *et al*., 2019). کاهش ارتفاع بوته در ژنوتیپ‌های گلرنگ به‌واسطه اعمال تنش خشکی متفاوت بود، برای مثال در توده‌های محلی همند و ورامین میانگین ارتفاع بوته در مقایسه با شاهد به‌ترتیب ۲۶/۴ و ۲۶/۶ سانتی‌متر کاهش یافت، درحالی‌که در ژنوتیپ‌های امیر و قزاقستانی میزان کاهش ارتفاع بوته به‌ترتیب ۴/۵ و ۷/۸ سانتی‌متر بود (جدول ۴). در تیمار شاهد رقم پرنیان و در تیمار تنش خشکی ژنوتیپ‌های پرنیان، قزاقستانی، گلدشت و رقم امیر ارتفاع بوته بیش‌تری داشتند (جدول ۴). مقایسه میانگین طول ریشه و ارتفاع بوته در شش ژنوتیپ گلرنگ نشان می‌دهد که نسبت ریشه به ساقه در رقم امیر به‌دلیل طول ریشه زیادتر و ارتفاع بوته متوسط بیش‌تر از سایر ژنوتیپ‌ها بود (جدول ۴).

براساس نتایج به‌دست‌آمده، در شرایط تنش خشکی، بیش‌ترین فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در رقم امیر و در مرتبه دوم در ژنوتیپ قزاقستانی مشاهده شد (جدول ۴). افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کاتالاز و پراکسیداز در سه رقم گلرنگ (گلدشت، فرامان و سینا) در تیمارهای آبیاری براساس ۶۵ و ۴۵ درصد ظرفیت زراعی (تنش خشکی)

گزارش شده است (Zafari *et al*., 2020). در شرایط تنش خشکی میزان فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز در گلرنگ افزایش می‌یابد، اما این افزایش در ارقام متحمل به خشکی بیش‌تر از ارقام حساس است (Manvelian *et al*., 2021).

محتوای نسبی آب برگ شاخص مناسبی برای بیان وضعیت آبی گیاه است (Silva *et al*., 2013). حفظ محتوای آب نسبی برگ به معنای توانایی برگ در حفظ مقادیر بیش‌تری آب در شرایط تنش است که از طریق قابلیت تنظیم اسمزی و یا توانایی ریشه در جذب آب حاصل می‌شود (Zadehbagheri *et al*., 2012). بنابراین تفاوت محتوای آب نسبی در ارقام مختلف می‌تواند به توانایی آن‌ها در جذب آب از خاک یا توانایی بستن روزنه‌ها و تعرق کم‌تر در شرایط تنش مربوط باشد (Pasban Eslam, 2015). کاهش محتوای نسبی آب برگ در پنج ژنوتیپ گلرنگ (گلدشت، پرنیان، لیناس، محلی اصفهان و پدیده) به واسطه تنش خشکی آخر فصل گزارش شده است که با نتایج این مطالعه همخوانی دارد (Manvelian *et al*., 2021). جیانگ و هوانگ (۲۰۰۱) نیز گزارش نمودند که بالابودن محتوای نسبی آب برگ در ژنوتیپ‌های متحمل به کم‌آبی می‌تواند به‌دلیل وجود برخی عوامل کم‌کننده تلفات آب، از طریق بستن روزنه‌ها و یا به‌واسطه جذب بیش‌تر آب از طریق گسترش و توسعه ریشه باشد (Jiang & Huang, 2001). محتوای نسبی آب برگ در ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی گلرنگ بالاتر از ارقام حساس گزارش شده است که مؤید نتایج این مطالعه نیز می‌باشد (Manvelian *et al*., 2021). نتایج این مطالعه نشان داد ژنوتیپ قزاقستانی و رقم امیر با بهره‌مندی از طول ریشه و قطر ریشه اصلی زیاد احتمالاً به واسطه جذب بیش‌تر آب از بیش‌ترین محتوای نسبی آب برگ در شرایط تنش خشکی برخوردار بودند (جدول‌های ۳، ۴ و ۵). هم‌چنین در شرایط تنش خشکی، مقادیر شاخص سبزینگی در ژنوتیپ‌های حساس به خشکی بیش‌تر و در ژنوتیپ‌های متحمل کم‌تر افزایش یافت (جدول ۵).

محدودبودن محیط برای رشد و توسعه ریشه در لوله پلیکا از یک طرف و ایجاد تنش گرمایی و در نتیجه محدودیت رشد اندام هوایی (ساقه) و زیرزمینی (ریشه) گیاه در لوله‌های پلیکایی که قسمت اعظم آن بیرون از خاک قرار گرفته بود و در شرایطی که هوا گرم و شدت تابش خورشیدی زیاد بوده است (اواسط روزهای گرم فصل رشد) در معرض گرمای مستقیم قرار گرفته از طرف دیگر سبب کم بودن تعداد غوزه و تعداد دانه تشکیل شده بخصوص در شرایط تنش خشکی شده بود (جدول‌های ۳ و ۵).

عملکرد دانه در واحد آزمایشی (تک بوته) در ژنوتیپ‌های گلرنگ موردمطالعه در دو سطح تیمار رطوبتی خاک متفاوت بود. در هر دو تیمار رطوبتی، ژنوتیپ‌های توده محلی ورامین و همند کم‌ترین عملکرد دانه را داشتند که در ارتباط با سیستم ریشه‌ای ضعیف (ریشه کم عمق و وزن خشک ریشه اندک) و کم بودن تعداد دانه می‌باشد (جدول‌های ۴ و ۵). از طرف دیگر با توجه به تفاوت طول دوره رشد ژنوتیپ‌های گلرنگ، میزان مصرف آب متفاوت و در رقم امیر چهار مرتبه، در ژنوتیپ قزاقستانی و رقم گلدشت سه مرتبه و در رقم پرنیان دو مرتبه کم‌تر از دو توده محلی همند و ورامین بود. مطالعات نشان می‌دهد ویژگی‌های مورفولوژیک ریشه و رشد آن‌ها می‌تواند در تحمل به تنش خشکی تأثیر زیادی داشته باشد. زیرا افزایش رشد، طول و عمق ریشه منجر به افزایش جذب آب از اعماق خاک و حفظ فعالیت ریشه و تداوم رشد اندام هوایی می‌شود (Palta *et al*., 2014). به بیان دیگر، همبستگی مثبت و معنی‌داری بین رشد ریشه و تحمل بیش‌تر به تنش خشکی وجود دارد (Gholamhoseini *et al*., 2021).

در این آزمایش نیز رقم امیر با برخورداری از سیستم ریشه‌ای مناسب (عمق، وزن و قطر ریشه مناسب)، محتوای نسبی آب برگ و تعداد دانه زیاد از بیش‌ترین عملکرد دانه در تیمار شاهد، برخوردار بود (جدول‌های ۴ و ۵). هم‌چنین رقم امیر به‌همراه ژنوتیپ قزاقستانی با برخورداری از سیستم ریشه‌ای عمیق و قطر ریشه زیاد آب بیش‌تری از اعماق خاک جذب کردند و محتوای نسبی آب برگ بیش‌تری داشتند. علاوه بر این، دو ژنوتیپ مذکور با برخورداری از بیش‌ترین

فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز تعداد دانه بیش‌تری در شرایط تنش خشکی تولید کردند و از بیش‌ترین عملکرد دانه برخوردار بودند (جدول‌های ۴ و ۵).

براساس نتایج به‌دست‌آمده، در شرایط بدون تنش، ارقام زودگل، وزن خشک ریشه، طول ریشه، اجزای عملکرد و عملکرد دانه بیش‌تری داشتند که با نتایج مندرج در جدول‌های ۳ و ۴ همخوانی داشت. وجود همبستگی مستقیم و معنی-دار بین صفات مرتبط با ریشه و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در شرایط تنش خشکی نشان می‌دهد که با افزایش وزن خشک و طول ریشه فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان بیش‌تر خواهد شد و افزایش وزن خشک ریشه سبب افزایش محتوای نسبی آب برگ، صفات مرتبط با عملکرد (تعداد غوزه در بوته) و عملکرد دانه می‌شود (شکل ۳). هم‌چنین نتایج بیانگر این موضوع بود که محتوای نسبی آب برگ با افزایش وزن خشک و طول ریشه بهبود می‌یابد و کم‌تر تحت تأثیر قطر ریشه قرار دارد. هم‌چنین نقش وزن خشک ریشه، تعداد شاخه فرعی و فعالیت آنزیم کاتالاز در افزایش عملکرد دانه ارقام گلرنگ در شرایط تنش خشکی بسیار پر رنگ‌تر از نقش سایر صفات بوده است (شکل ۳).

نتایج ضرایب همبستگی بیانگر این موضوع است که در بهبود ژنتیکی عملکرد دانه ارقام گلرنگ در شرایط تنش خشکی بهتر است از شاخص‌های وزن خشک ریشه، فعالیت آنزیم کاتالاز و محتوای نسبی آب برگ استفاده نمود و گزینش برای مقادیر بیش‌تر این صفات در فعالیت‌های به‌نژادی صورت گیرد. چنین صفاتی دارای وراثت پذیری به مراتب بیش‌تر از عملکرد دانه به‌ویژه در نسل‌های مقدماتی و در حال تفکیک در به‌نژادی گلرنگ می‌باشد (Mozaffari & Asadi, 2006).

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج کلی این آزمایش نشان داد که در شرایط تنش خشکی، طول ریشه، قطر ریشه، فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز و شاخص سبزینگی (SPAD) به‌ترتیب به میزان ۲۸/۶، ۱۳/۶، ۱۲۲/۷، ۲۷/۰ و ۱۷/۵ درصد افزایش و وزن خشک ریشه، ارتفاع بوته، محتوای نسبی آب برگ، تعداد غوزه، تعداد دانه در بوته و عملکرد دانه در واحد آزمایشی در شرایط تنش خشکی به‌ترتیب ۲۳/۶، ۲۰/۸، ۱۵/۲، ۲۵/۴، ۶۳/۳ و ۷۴/۹ درصد کاهش یافت. هم‌چنین تنوع قابل ملاحظه‌ای بین ژنوتیپ‌های گلرنگ از نظر رشد و وزن خشک ریشه در واکنش به تنش خشکی وجود داشت. هم‌چنین شش ژنوتیپ گلرنگ عکس‌العمل‌های متفاوتی از نظر زمان گل‌دهی، ارتفاع بوته، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، محتوای نسبی آب برگ، شاخص سبزینگی، اجزای عملکرد و عملکرد دانه در دو شرایط بدون تنش و تنش خشکی نشان دادند. در شرایط آبیاری کامل، رقم امیر با برخورداری از سیستم ریشه‌ای مناسب، محتوای نسبی آب برگ زیاد و حداکثر تعداد دانه از بیش‌ترین عملکرد دانه (۵/۰۳ گرم در بوته) برخوردار بود. علاوه بر این، این رقم در شرایط تنش خشکی با گل‌دهی زودهنگام، وزن خشک و طول ریشه بیش‌تر، برخورداری از بیش‌ترین فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز، بیش‌ترین عملکرد دانه (۱/۶۷ گرم در بوته) را دارا بود. بررسی همبستگی بین صفات نیز، نشان‌دهنده این مطلب بود که صفات وزن خشک ریشه، فعالیت آنزیم کاتالاز، تعداد دانه در گیاه، تعداد غوزه و محتوای نسبی آب برگ بهترین شاخص‌های انتخاب برای بهبود ژنتیکی عملکرد دانه در گیاه گلرنگ در شرایط تنش خشکی می‌باشند. بر این اساس، رقم امیر به‌دلیل برخورداری از سیستم ریشه‌ای مناسب و ویژگی‌های برتر زراعی و فیزیولوژیک، عملکرد دانه بیش‌تری داشت و به‌عنوان ژنوتیپ برتر در این آزمایش گزینش شد.

۷. تشکر و قدردانی

از مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر به‌خاطر حمایت مالی این پژوهش، تشکر و قدردانی می‌گردد.

۸. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۹. منابع

غلامحسینی، مجید؛ حبیب‌زاده، فرهاد و همتی، پریسا (۱۴۰۰). ارزیابی خصوصیات ریشه و اندام هوایی ژنوتیپ‌های کنجد تحت شرایط مختلف رطوبت خاک. *به‌زراعی کشاورزی*، ۲۳(۲)، ۳۹۳-۴۰۷.

https://doi.org/10.22059/jci.2021.309428.2445

جبّاری، حمید (۱۴۰۰). ارزیابی لاین امیدبخش SAF-95-14 گلرنگ از نظر تحمل به تنش خشکی در شرایط کنترل‌شده. *گزارش نهایی طرح پژوهشی*. تهران: مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر.

حسینعلی‌پور، بهاره؛ راهنما، افراسیاب و فرخیان فیروزی، احمد (۱۳۹۹). اثر تنش خشکی بر رشد و معماری ریشه گندم در مرحله رشد رویشی. *علوم گیاهان زراعی ایران*. ۵۱ (۱)، ۶۳-۷۵.

https://doi.org/10.22059/ijfcs.2019.266586.654531

جبّاری، حمید؛ خوش‌خلق سیما، نیر اعظم؛ اکبری، غلام‌عباس؛ اله‌دادی، ایرج؛ شیرانی‌راد، امیرحسین و حامد، علی. (۱۳۹۵). بررسی رابطه سیستم ریشه‌ای با روابط آبی کلزا در شرایط تنش خشکی، *به زراعی کشاورزی*. ۱۸ (۱)، ۱-۱۹.

https://doi.org/10.22059/jci.2016.56544

امیدی، امیرحسین (۱۳۹۰). اثر قطع آبیاری در مراحل مختلف رشد بر عملکرد دانه و شاخص‌های تحمل به تنش در سه رقم گلرنگ. *نشریه علوم زراعی ایران*. ۱۳ (۱)،۱۱۶-۱۳۰.

References

Aebi, H. (1984). Catalase in vitro. *Methods in Enzymology*, *105*, 121-126.

Achhale, D. (2016). *Screening of safflower* (*Carthamus tinctorius* L.) *Genotypes for drought tolerance*. Master of science dissertation. Madhya: Rajmata Vijayaraje Scindia Krishi Vishwa Vidyalaya gwalior college of agriculture.

Bengough, A. G., McKenzie, B. M., Hallett, P. D., & Valentine, T. A. (2011). Root elongation, water stress, and mechanical impedance: A review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *Journal of Experimental Botany*, *62*, 59-68.

Chance, B., & Maehly, A. C. (1955). Assay of catalase and peroxidase. *Methods in Enzymology*, *2*, 764-817.

Chavoushi, M., Najafi, F., Salimi, A., & Angaji, S. A. (2019). Improvement in drought stress tolerance of safflower during vegetative growth by exogenous application of salicylic acid and sodium nitroprusside. *Industrial Crops and Products*, *134*, 168-176.

Corwin, D. L. (2021). Climate change impacts on soil salinity in agricultural areas. *European Journal of Soil Science*, *72*(2), 842-862.

Gholamhoseini, M., habibzadeh, F., & hemmati, P. (2021). Evaluation of Root and Shoot Characteristics of Sesame Genotypes under Different Soil Moisture Conditions. *Journal of Crops Improvement*, *23*(2), 393-407. https://doi.org/10.22059/jci.2021.309428.2445. (In Persian).

Hojati, M., Modarres-Sanavy, S. Karimi, M. & Ghanati, F. (2011). Responses of growth and antioxidant systems in *Carthamus tinctorius* L. under water deficit stress. *Acta Physiologiae Plantarum*, *33*(1),105-112.

Hosseinalipour, B., Rahnama, A., & Farrokhian Firouzi, A. (2020). Effect of drought stress on wheat root growth and architecture at vegetative growth stage. *Iranian Journal of Field Crop Science*, *51*(1), 63-75. https://doi.org/10.22059/ijfcs.2019.266586.654531. (In Persian).

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*(4), 1-31. https://doi.org/10.1007/s13593-015-0344-8

Jabbari, H. (2021). Evaluation of promising safflower line SAF-95-14 for drought tolerance in controlled conditions. *Final report, Ministry of Agriculture Jihad*. Tehran: Agricultural Research, Education and Extension Organization, Seed and Plant Improvement Institute. (In Persian).

Jabbari, H., Khosh kholgh Sima, N. A., Akbari, G. A., Allahdadi, I., Shirani rad, A. H., & Hamed, A. (2016). Study of root system relationship with water relations in Rapeseed under drought stress conditions. *Journal of Crops Improvement*, *18*(1), 1-19. https://doi.org/10.22059/jci.2016.56544. (In Persian).

Jiang, Y., & Huang, B. (2001). Osmotic adjustment and root growth associated with drought preconditioning- enhanced heat tolerance in Kentucky bluegrass. *Crop Science*, *41*, 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 Environment*, *65*, 563-567.

Manvelian, J., Weisany, W., Abdul-razzak Tahir, N., Jabbari, H., & Diyanat, M. (2021). Physiological and biochemical response of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) cultivars to zinc application under drought stress. *Industrial Crops and Products*, *172*, 114069.

Misra, A., & Sricastatva, N. K. (2000). Influence of water stress on Japanese mint. *Journal of Herbs, Spocces and Medician Plants*, *7*, 51-58.

Mozaffari, K., & Asadi, A. A. (2006). Relationships among traits using correlation, principal components and path analysis in safflower mutants sown in irrigated and drought stress condition. *Asian Journal of Plant Sciences*, *5*(6), 977-983.

Omidi, A. H. (2012). Effect of irrigation withhold at different growth stages on grain yield and stress tolerance indices in three safflower cultivars. *Iranian Journal of Crop Sciences*, *13*(1), 116-130. (In Persian).

Palta, J. A., Chen, X., Milroy, S. P., Rebetzke, G. J., Dreccer, M. F., & Watt, M. (2011). Large root systems: Are they useful in adapting wheat to dry environments? *Functional Plant Biology*, *38*, 347-354.

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

Pasban Eslam, B. (2015). Stability of grain and oil yields and its components in oilseed Rape (*Brassica napus* L.) under early and late season drought. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, *25*(4), 176-187.

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.

Rousseau, D., Widiez, T., Di Tommaso, S., Rositi, H., Adrien, J., Maire, E., Langer, M., Oliver, C., Peyrin, F., & Rogowsky, P. (2015). Fast virtual histology using X-ray in-line phase tomography: application to the 3D anatomy of maize developing seeds. *Plant methods*, *11*(55), 1-10.

Salem, N., Msaada, K., Dhifi, W. W., Sriti, J. Mejri, H. Limam, F., & Marzouk, B. (2014). Effect of drought on safflower natural dyes and their biological activities. *Experimental and Clinical Sciences*, *13*, 1-18.

Silva, M. D. A., Jifon, J. L., Santos, C. M. D., Jadoski, C. J., & Silva, J. A. G. D. (2013). Photosynthetic capacity and water use efficiency in sugarcane genotypes subject to water deficit during early growth phase. *Brazilian archives of biology and technology*, *56*(5), 735-748.

Singh, V., & Nimbkar, N. (2007). Safflower (*Carthamus tinctorius* L.). In *Genetic Resources Chromossome Engineering, and Crop Improvement: Oil Crops*. edited by Singh, R. J. New York: CRC Press.

USDA Agricultural Research Service. (2019). *Germplasm Resources Information Network*

(GRIN). The United States of America: USDA Agricultural Research Service. https://doi.org/10.15482/USDA.ADC/1212393.

Wasaya, A., Zhang, X., Fang, Q. & Yan, Z. (2018). Root Phenotyping for Drought Tolerance: A Review. *Agronomy*, *8*(11), 241-261.

Wu, W., Duncan, R.W., & Ma, B. L. (2017). Quantification of canola root morphological traits under heat and drought stresses with electrical measurements. *Plant & Soil*, *415*, 229-244.

Zadehbagheri, M., Mojtaba, M., Javanmardi, S., & Sharafzadeh, S. (2012). Effect of drought stress on yield and yield components, relative leaf water content, proline and potassium ion accumulation in different white bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotype. *African Journal of Agricultural Research*, *7*(42), 5661-5670.

Zafari, M., Ebadi, A., Jahanbakhsh, S., & Sedghi, M. (2020). Safflower (*Carthamus tinctorius*) biochemical properties, yield, and oil content affected by 24-epibrassinosteroid and genotype under drought stress. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *368*(22), 6040-6047.