



Evaluation of the Effects of Zinc and Manganese Sulfate on the Improvement of Physiological Characteristics and Yield of Rapeseed Genotypes under Late-Season Drought Stress

Ghorban Khodabin¹ | Zeinolabedin Tahmasebi Sarvestani² | Amirhossein Shirani Rad³ |
Esmail Bakhshandeh⁴ | Mojdeh Sadat Khayat Moghadam⁵ | Shahryar Kazemi⁶ |
Mahsa Rafati Alashti⁷ | Ali Heidarzadeh⁸

1. Corresponding Author, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. E-mail: G.khodabin@modares.ac.ir
2. Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. E-mail: tahmaseb@modares.ac.ir
3. Seed and Plant Improvement Institute (SPII), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. E-mail: a.shiranirad@areeo.ac.ir
4. Genetics and Agricultural Biotechnology Institute of Tabarestan and Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: e.bakhshandeh@sanru.ac.ir
5. Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran. E-mail: moghadam.mojde@shahroodut.ac.ir
6. Department of Agricultural Sciences, Payame Noor University, Tehran, Iran. E-mail: sh.kazemi@pnu.ac.ir
7. Department of Agricultural Sciences, Payame Noor University, Tehran, Iran. E-mail: m.alashti@pnu.ac.ir
8. Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. E-mail: ali.heidarzadeh@modares.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received: 29 November 2021
Received in revised form:
27 February 2022
Accepted: 09 March 2022
Published online:
17 December 2022

Keywords:

Chlorophyll,
late-season drought,
oil percentage,
proline,
relative water content,
stomatal resistance

ABSTRACT

In order to study the effects of late-season drought stress and foliar application of zinc sulfate ($ZnSO_4$) and manganese sulfate ($MnSO_4$) on physiological characteristics and yield of rapeseed cultivars, a factorial split-plot test has been conducted in a randomized complete blocks design for two cultivation years (2017-2019) in Karaj, Iran. The experimental treatments include two levels of irrigation (full irrigation (control) and withholding irrigation from flowering stage) and four levels of foliar application (control, $ZnSO_4$, and $MnSO_4$, separately, as well as their combined application) as factorial in the main plots, with rapeseed genotypes (Nima, Niloofar, and KS7) considered as subplots. Combined foliar application of zinc and manganese sulfate under full irrigation conditions increase the content of seed oil and soluble carbohydrates by 3% and 11%, respectively, compared to the control. On the other hand, withholding irrigation from flowering stage increases the percentage of seed oil and leaf proline content, compared to the control by 9% and 5.2%, respectively. Niloofar genotype has had the highest seed yield (5261 kg/ha) under full irrigation conditions, i.e. 9% and 11.8% higher than KS7 and Nima genotypes, respectively. Nima genotype with 3371 kg/ha has had the highest yield in the conditions of withholding irrigation. In general, in both irrigation treatments, simultaneous foliar application of zinc sulfate and manganese has had the greatest impact on the physiological traits of the studied genotypes, thus Niloofar genotype is recommended for full irrigation and Nima genotype for interrupted irrigation.

Cite this article: Khodabin, Gh., Sarvestani, Z., Shirani Rad, A. H., Bakhshandeh, E., Sadat Khayat Moghadam, M., Kazemi, Sh., Rafati Alashti, M., & Heidarzadeh, A. (2022). Evaluation of the Effects of Zinc and Manganese Sulfate on the Improvement of Physiological Characteristics and Yield of Rapeseed Genotypes under Late-Season Drought Stress. *Journal of Crops Improvement*, 24 (4), 1217-1232. DOI: <http://doi.org/10.22059/jci.2022.334740.2645>





بررسی تأثیر سولفات روی و منگنز بر بهبود صفات فیزیولوژیکی و عملکرد ژنوتیپ‌های کلزا تحت شرایط تنش خشکی آخر فصل

قربان خدابین^۱ | زین العابدین طهماسبی سروستانی^۲ | امیرحسین شیرانی‌راد^۳ | اسماعیل بخشنده^۴ |
مژده سادات خیاط مقدم^۵ | شهریار کاظمی^۶ | مهسا رفعتی آلاشتی^۷ | علی حیدرزاده^۸

۱. نویسنده مسئول، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: G.khodabin@modares.ac.ir
۲. گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: tahmaseb@modares.ac.ir
۳. مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. رایانامه: a.shiranirad@areeo.ac.ir
۴. پژوهشکده ژنتیک و زیست‌فناوری کشاورزی طبرستان، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: e.bakhshandeh@sanru.ac.ir
۵. گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران. رایانامه: moghadam.mojde@shahroodut.ac.ir
۶. گروه علوم کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران. رایانامه: sh.kazemi@pnu.ac.ir
۷. گروه علوم کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران. رایانامه: m.alashti@pnu.ac.ir
۸. گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: ali.heidarzadeh@modares.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

به منظور بررسی اثرات تنش خشکی آخر فصل و محلول‌پاشی سولفات روی و منگنز بر صفات فیزیولوژیکی و عملکرد ژنوتیپ‌های کلزا، آزمایشی به صورت فاکتوریل کرت خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی طی دو سال (۹۷-۱۳۹۶ و ۹۸-۱۳۹۷) در مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل آبیاری در دو سطح (آبیاری کامل (شاهد) و قطع آبیاری از مرحله گلدهی) و چهار سطح محلول‌پاشی (شاهد، سولفات روی، سولفات منگنز و کاربرد ترکیبی آن‌ها با غلظت چهار گرم در لیتر) به صورت فاکتوریل در کرت‌های اصلی و ژنوتیپ‌های کلزا (نیما، KS7 و نیلوفر) در کرت‌های فرعی قرار گرفتند. محلول‌پاشی ترکیبی سولفات روی و منگنز در شرایط آبیاری کامل به ترتیب موجب افزایش سه و ۱۱ درصدی محتوای روغن دانه و کربوهیدرات محلول برگ نسبت به شاهد شد. از طرف دیگر در شرایط قطع آبیاری، محتوای روغن دانه و میزان پروپیلین برگ را نسبت به شاهد به ترتیب ۹ و ۵/۲ درصد افزایش داد. ژنوتیپ نیلوفر در شرایط آبیاری کامل بیش‌ترین میزان عملکرد دانه (۵۲۶۱ کیلوگرم در هکتار) را دارا بود که نسبت به ژنوتیپ KS7 و نیما، به ترتیب، به میزان ۹ و ۱۱/۸ درصد بالاتر بود. ژنوتیپ نیما با ۳۳۷۱ کیلوگرم در هکتار در شرایط قطع آبیاری بیش‌ترین عملکرد را داشت. به طور کلی، در هر دو تیمار آبیاری، کاربرد محلول‌پاشی هم‌زمان سولفات روی و منگنز بر صفات فیزیولوژیکی ژنوتیپ‌های مورد بررسی بیش‌ترین تأثیر را داشت، به طوری که در آبیاری کامل ژنوتیپ نیلوفر و در شرایط قطع آبیاری ژنوتیپ نیما قابل توصیه است.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۰۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۲/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۹/۲۶

کلیدواژه‌ها:

پروپیلین،
خشکی آخر فصل،
درصد روغن،
کلروفیل،
محتوای نسبی آب برگ،
مقاومت روزنه‌ای.

استناد: خدابین، ق، طهماسبی سروستانی، ز، شیرانی‌راد، ا، ح، بخشنده، ا، خیاط مقدم، م، س، کاظمی، ش، رفعتی آلاشتی، م، و حیدرزاده، ع (۱۴۰۱). بررسی تأثیر سولفات روی و منگنز بر بهبود صفات فیزیولوژیکی و عملکرد ژنوتیپ‌های کلزا تحت شرایط تنش خشکی آخر فصل. *به زراعی کشاورزی*، ۲۴ (۴)، ۱۲۱۷-۱۲۳۳. DOI: <http://doi.org/10.22059/jci.2022.334740.2645>



۱. مقدمه

کلزا (*Brassica napus* L.) از نظر تجاری یک گیاه دانه روغنی است که در بیش از ۳۴/۷ میلیون هکتار در سراسر جهان در سال ۲۰۱۷ کشت شده است (FAO, 2017). در حال حاضر پس از نخل و سویا، سومین محصول مهم دانه‌های روغنی در جهان است و به‌عنوان یک محصول جایگزین برای تناوب زراعی مبتنی بر غلات، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران استفاده می‌شود (Hamzei & Soltani, 2012). علاوه بر این، کلزا به‌دلیل راندمان مصرف آب بالا و تحمل نسبی به تنش خشکی، محصولی مناسب برای کشت در مناطق خشک است (Al-Barrak, 2006).

تنش خشکی بر بسیاری از جنبه‌های رشدی گیاه مؤثر است و موجب تغییرات مورفولوژیکی در ساختار گیاه می‌شود و با تأثیر بر فرایندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی از قبیل فتوسنتز، تنفس، متابولیسم عناصر غذایی و جذب، تراوایی غشاهای سلولی و پایداری آن‌ها، روابط آبی گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Salehi-Lisar *et al.*, 2016; Rashtbari *et al.*, 2020). در اثر خشکی از مرحله ساقه‌رفتن تا گلدهی، خورجین‌های نارس کلزا به زمین می‌ریزد، انتقال مواد فتوسنتزی از ساقه به دانه متوقف شده و در نتیجه عملکرد دانه کاهش می‌یابد (Khan *et al.*, 2010). کمبود آب در مرحله گلدهی، که حساس‌ترین مرحله رشدونمو کلزا به کمبود آب است، سبب افت قابل توجه تعداد دانه و وزن هزاردانه شد و کمیت و کیفیت روغن دانه را نیز کاهش داد (Maleki *et al.*, 2013). گزارش شده است که تنش خشکی آخر فصل موجب افزایش مقاومت روزنه‌ای، پرولین برگ و کاهش مقدار کلروفیل کل و محتوی نسبی آب برگ در ارقام کلزا شد (Khayat Moghadam *et al.*, 2021a).

استفاده بهینه از کودهای شیمیایی به‌صورت خاک مصرف، در اکثر اراضی زراعی مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران، چندان رضایت‌بخش نیست، زیرا به‌دلیل کمبود بارندگی و عدم تأمین آب کافی در اواخر دوره رشد، امکان جذب عناصر کم‌مصرف از خاک توسط گیاه محدود می‌شود. در شرایطی که آب قابل‌دسترس کم باشد، استفاده خاکی مواد غذایی در افزایش جذب و انتقال مواد غذایی به شاخه و برگ گیاه همیشه مؤثر نیست. محلول‌پاشی برگ یکی از روش‌های سریع در واکنش گیاه به کود بوده که علاوه بر جنبه اقتصادی، باعث حفظ محیط‌زیست و درنهایت در رسیدن به کشاورزی پایدار نیز مؤثر است. عناصر کم‌مصرف نقش مهمی بر رشد و بهره‌وری گیاهان دارند و باید به مقدار کافی در نسبت‌های مناسب عرضه شوند (Athukorala, 2021). در اکثر خاک‌های ایران، قابلیت حل عناصر کم‌مصرف کم‌تر است و باعث کاهش جذب این عناصر می‌شود و درنهایت نیاز گیاه به این عناصر رو به افزایش است (Alloway, 2008).

عناصر کم‌مصرف مانند منگنز و روی تحت تأثیر pH و بافت خاک هستند و فقدان آن‌ها در خاک‌های آهکی دیده می‌شود (Malakouti & Homae, 2004). از طرفی، تغذیه خوب گیاهان در مقاومت آن‌ها به انواع تنش‌ها در این شرایط نقش دارد. منگنز (Mn) به‌عنوان یک جزء ساختاری از پروتئین در فتوسیستم دو و هم‌چنین به‌عنوان ذخیره و تحویل الکترون به مراکز واکنش کلروفیل عمل می‌کند (Diedrick, 2010). گزارش شده است محلول‌پاشی سولفات منگنز بر گیاه کلزا باعث افزایش عملکرد دانه و درصد روغن شد (Khan, 2017). روی (Zn) عنصر حیاتی بسیاری از آنزیم‌های گیاهی است که مسئول بیوسنتز پروتئین‌های مهم، کلروفیل و کربوهیدرات‌ها هستند (Tsonev & Lidon, 2012). روی باعث افزایش صفات فنولوژی، فیزیولوژی و اسیدهای چرب کلزا تحت تنش خشکی شد (Aram *et al.*, 2021). بررسی اثر محلول‌پاشی روی و منگنز تحت تنش خشکی بر رشد گندم زمستانه باعث افزایش ۱۳ درصدی عملکرد دانه شد. علاوه بر این، میزان فتوسنتز، تعداد سنبله‌های بارور، تعداد دانه در سنبله و به‌ویژه راندمان مصرف آب (WUE) با محلول‌پاشی ریزمغذی‌ها افزایش یافت (Karim *et al.*, 2012). تأثیر مثبت عناصر روی و منگنز بر صفات زراعی کلزا (Khodabin *et al.*, 2020) و گل‌رنگ (Movahhedy-Dehnavy *et al.*, 2009) تحت شرایط تنش خشکی در مطالعات پژوهش‌گران دیگر تأیید شده است.

پژوهش حاضر در راستای نیل به اهدافی چون ارزیابی و شناسایی واکنش سه ژنوتیپ مختلف کلزا در منطقه کرج در رابطه با محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی روی و منگنز، با توجه به پتانسیل کشت این محصول در این منطقه، تحت تنش خشکی آخر فصل از لحاظ عملکرد دانه و برخی صفات فیزیولوژیکی انجام گرفت.

۲. مواد و روش‌ها

به‌منظور ارزیابی پاسخ ژنوتیپ‌های کلزا به محلول‌پاشی سولفات‌روی و سولفات‌منگنز در شرایط تنش خشکی آخر فصل، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل کرت خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در دو سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶ و ۹۸-۱۳۹۷ در مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج با موقعیت ۳۵ درجه و ۵۹ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۷۵ دقیقه طول شرقی و ارتفاع ۱۳۱۳ متر از سطح دریا با متوسط بارندگی بلندمدت ۲۴۴ میلی‌متر اجرا شد. آمار داده‌های هواشناسی محل آزمایش در طی دو سال زراعی ارائه شده است (جدول ۱).

جدول ۱. تغییرات میانگین دما و بارندگی ایستگاه هواشناسی منطقه کرج در سال‌های زراعی ۹۷-۱۳۹۶ و ۹۸-۱۳۹۷

ماه	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر
سال	۹۶	۹۶	۹۶	۹۶	۹۶	۹۶	۹۷	۹۷	۹۷	۹۷
بارش (mm)	۰	۴/۸	۰/۶	۴/۷	۱۹/۸	۳۰/۶	۱۴/۱	۱۸/۸	۲۰	۷/۲
میانگین دما	۲۳/۷	۱۷	۱۱/۵	۶/۶	۴	۶/۴	۱۴/۶	۱۳/۶	۱۸/۴	۲۵/۵
ماه	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر
سال	۹۷	۹۷	۹۷	۹۷	۹۷	۹۷	۹۸	۹۸	۹۸	۹۸
بارش (mm)	۰/۸	۲۹/۱	۶۵/۹	۳۴/۳	۵۹/۲	۱۲/۴	۵۲/۵	۲۵/۵	۱۲	۰
میانگین دما	۲۴	۱۶/۶	۹	۷/۳	۴/۸	۵/۸	۹/۲	۱۴/۸	۲۱/۴	۲۷/۴

مشخصات خاک محل آزمایش در جدول (۲) ارائه شده است. در این آزمایش عامل آبیاری در دو سطح شامل آبیاری معمول (شاهد) و قطع آبیاری از مرحله ۵۰ درصد گلدهی به بعد (سیستم کدبندی BBCH کد شماره ۶۵) و عامل محلول‌پاشی در چهار سطح (محلول‌پاشی با آب، محلول‌پاشی با غلظت چهار گرم در لیتر سولفات روی، محلول‌پاشی چهار گرم در لیتر سولفات‌منگنز و محلول‌پاشی هم‌زمان سولفات‌روی و سولفات‌منگنز با غلظت چهار گرم در لیتر (Khodabin *et al.*, 2021; Movahhedy-Dehnavy *et al.*, 2009) به‌صورت فاکتوریل به‌عنوان کرت اصلی و ژنوتیپ‌های کلزا شامل نیما به‌عنوان رقم شاهد و رقم نیلوفر و لاین امیدبخش KS7 در کرت‌های فرعی قرار گرفتند. زمان کاشت در هر دو سال زراعی در تاریخ پنجم مهرماه ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷ بود. به‌منظور آماده‌سازی زمین، قبل از اجرای آزمایش، زمین موردنظر آبیاری شد و پس از گاورو شدن به‌وسیله گاوآهن برگردان‌دار شخم و سپس دیسک و ماله زده شد. هر کرت آزمایشی، شامل شش ردیف کاشت به طول شش متر با فاصله ۳۰ سانتی‌متر بود که دو ردیف کناری به‌عنوان حاشیه در نظر گرفته شدند. فاصله بین کرت‌های اصلی ۱۸۰ سانتی‌متر، فاصله بین کرت‌های فرعی ۶۰ سانتی‌متر و فاصله بین تکرارها سه متر بود. فاصله بوته‌ها روی ردیف‌های کاشت نیز چهار سانتی‌متر در نظر گرفته شد. کودهای مصرفی براساس نتایج آزمون خاک عبارت بودند از ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار فسفر (از منبع فسفات آمونیوم) و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار پتاسیم (از منبع سولفات پتاسیم) به‌صورت هم‌زمان با آماده‌سازی بستر بذر، ۳۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن (از منبع اوره؛ ۱۰۰ کیلوگرم در مرحله کاشت، ۱۵۰ کیلوگرم در مرحله ساقه‌دهی و ۱۰۰ کیلوگرم در مرحله غنچه‌دهی) به‌صورت سرک به خاک داده شدند. پخش علف‌کش ترفلان (به‌صورت پیش‌کاشتی) به میزان ۲/۵ لیتر در هکتار به‌طور

یکنواخت در سطح مزرعه انجام شد و به‌وسیله دیسک سبک، کود و علف‌کش با خاک مخلوط شدند. پس از اجرای آزمایش مطابق نقشه کاشت، آبیاری به‌روش نشتی (جوی پشته) صورت گرفت و زمان‌بندی آبیاری براساس تغییرات روزانه رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه با استفاده از دستگاه TDR (لوله‌های پروب دستگاه را در عمق ۱۰۰ سانتی‌متری خاک در قسمت بالای پشته و در قسمت‌های مختلف هر کرت آزمایشی قرار داده شد) انجام شد. بر این اساس، آبیاری در تیمار آبیاری کامل زمانی صورت گرفت که ۵۰ درصد رطوبت قابل‌استفاده (در این پژوهش با توجه به این‌که ظرفیت مزرعه‌ای خاک (FC) و نقطه پژمردگی دائم (PWP) به‌ترتیب ۲۴ و ۱۰ درصد بود، ۵۰ درصد رطوبت قابل‌استفاده زمانی بود که دستگاه TDR عدد ۱۷ درصد حجمی را نشان داد) از خاک تخلیه شد (Khodabin *et al.*, 2021)، حجم آب مصرفی در هر آبیاری با استفاده از روابط (۱) و (۲) محاسبه شد.

$$\text{رابطه ۱)} \quad \text{MAD} = \text{FC} - \theta / \text{FC} - \text{PWP}$$

MAD حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی خاک در سطح توسعه ریشه، FC و PWP به‌ترتیب رطوبت حجمی خاک در حد ظرفیت مزرعه و نقطه پژمردگی دائم و θ محتوای رطوبت حجمی اندازه‌گیری‌شده توسط TDR می‌باشد.

$$\text{رابطه ۲)} \quad \text{ASW} = \text{FC} - \text{PWP} \quad \text{Vd} = \text{MAD} \times \text{ASW} \times \text{Rz} \times 10$$

در رابطه (۲)، ASW آب قابل‌دسترس (قابل‌استفاده)، Rz عمق توسعه ریشه (۱۰۰ سانتی‌متر) (Allen *et al.*, 1998) و عدد ۱۰ ثابت تبدیل (سانتی‌متر به میلی‌متر) است. جهت تعیین و کنترل مقدار آب از لوله‌های مجهز به کنتور استفاده شد. کل مقدار آب مصرفی در شرایط آبیاری کامل و قطع آبیاری به‌ترتیب ۵۳۰۰ و ۲۶۰۰ مترمکعب در هکتار در سال اول و ۴۲۰۰ و ۲۰۰۰ مترمکعب در هکتار در سال دوم بود.

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش در عمق‌های ۰-۳۰ و ۰-۶۰-۳۰ سانتی‌متر در طول فصل رشد (۹۶-۹۸)

عمق نمونه‌برداری (cm)	واکنش گل‌اشباع	هدایت الکتریکی خاک (dS.m ⁻¹)	کربن آلی (%)	فسفر قابل‌جذب (mg/kg)	پتاسیم قابل‌جذب (mg/kg)	آهن قابل‌جذب (mg/kg)	نیترژن کل (%)
۳۰-۰	۷/۲	۱/۹۱	۰/۶۴	۱۶/۱	۲۷۸	۴/۷۳	۰/۰۶
۶۰-۳۰	۷/۴	۱/۰۱	۰/۶۴	۱۳/۲	۱۶۴	۴/۹۴	۰/۰۴
عمق نمونه‌برداری (cm)	منگنز قابل‌جذب (mg/kg)	روی قابل‌جذب (mg/kg)	مس قابل‌جذب (mg/kg)	رس (%)	سیلت (%)	شن (%)	بافت خاک
۳۰-۰	۲/۷۵	۰/۵	۰/۶	۲۴	۲۶	۴۰	لومی
۶۰-۳۰	۳/۰۱	۰/۷۶	۰/۷	۲۷	۳۸	۳۸	لومی

کنترل آفات به‌ویژه شته مومی با استفاده از سموم کنفیدور (۲۵۰ میلی‌لیتر در هکتار) و دیمتوات (۱۵۰ میلی‌لیتر در هکتار) به‌صورت ترکیبی صورت گرفت. محلول‌پاشی سولفات‌منگنز و سولفات‌روی در دو مرحله خروج از روزت (سیستم کدبندی BBCH کد شماره ۳۲) و ۱۴ روز بعد (Khodabin *et al.*, 2021)، به‌وسیله سم‌پاش دستی (مدل GT-PS-12L مجهز به نازل اسپری مخروطی) انجام شد. برای کالیبراسیون سم‌پاش مذکور، مقداری آب در مخزن سم‌پاش ریخته و مسافتی که طول آن مشخص بود، سم‌پاشی شد. مسافت طی‌شده در عرض کار سم‌پاش ضرب شد و سطح سم‌پاشی به‌دست آمد و با استفاده از تناسب ساده مقدار مصرف محلول در هکتار (۱۰۰۰ لیتر در هکتار) به‌دست آمد. برای تیمارهای شاهد نیز همان حجم آب توسط سم‌پاش، پس از کالیبراسیون دستگاه سم‌پاش با توجه به مساحت زمین و پس از محاسبه میزان محلول موردنیاز، بر روی برگ‌ها آب‌پاشی شد.

جهت اندازه‌گیری صفات فیزیولوژیک مانند کلروفیل، محتوای نسبی آب و پرولین در ساعت ۱۱ صبح، سه برگ جوان

و توسعه‌یافته از بالای پوشش گیاهی از سه ردیف میانی هر کرت برداشت شد. درصد محتوای نسبی آب برگ با رابطه زیر محاسبه شد (Rodriguez *et al.*, 2002).

$$RWC = (FW - DW) / (TW - DW) \times 100 \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن، RWC محتوای نسبی آب برگ، FW وزن تر برگ، TW وزن برگ آماس‌شده، DW وزن خشک برگ است. اندازه‌گیری غلظت کلروفیل با دستگاه اسپکتروفوتومتر (Australia, Varian Cary WinUV 6000i) انجام و جذب محلول در طول موج‌های ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر قرائت شد. نتایج برحسب میلی‌گرم بر گرم وزن تر محاسبه و ارائه شد (Arnon, 1949). مقدار پروپیلین برگ نیز در مرحله خورجین‌دهی و ۱۵ روز پس از اعمال قطع آبیاری، مقدار ۰/۱ گرم از ماده‌تر گیاهی (برگ) وزن شد و پس از انجام مراحل مختلف و عصاره‌گیری، مقدار پروپیلین در طول موج ۵۲۰ نانومتر در دستگاه اسپکتروفوتومتر اندازه‌گیری شد (Bates *et al.*, 1973) و برحسب میکرومول بر گرم وزن تر بیان شد. همچنین از پرومتر (DELTA-T DEVICES, Cambridge)، جهت اندازه‌گیری مقاومت روزنه‌ای در مرحله خورجین‌دهی استفاده شد.

جهت تعیین عملکرد دانه، در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک مساحتی به‌اندازه ۴/۸ مترمربع از هر کرت آزمایشی کف بر شد. سپس با استفاده از کمباین مخصوص، دانه‌ها از بوته جدا شد. بعد از قهوه‌ای‌شدن پشت غلاف، هر دو روز یک‌بار از غلاف‌ها نمونه‌برداری شد و وزن تر بذر آن‌ها اندازه‌گیری و به‌مدت ۴۸ ساعت در آون در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد تا وزن خشک به‌دست آمد. به این طریق میزان رطوبت بذر هر دو روز یک‌بار محاسبه شد. این روند تا رسیدن بذر به ۱۲ درصد ادامه یافت. زمانی که رطوبت بذر به ۱۲ درصد رسید، عملکرد بذر محاسبه شد. جهت تعیین درصد روغن دانه، از هر تیمار پنج گرم دانه توزین و پس از خشک‌کردن در آون ۷۲ درجه به‌مدت ۴۸ ساعت، نمونه‌ها آسیاب شدند و سپس با استفاده از دستگاه NMR (Germany, Bruker mq20) درصد روغن اندازه‌گیری شد.

در پایان پس از اطمینان از مفروضات آزمایشی، آزمون کلموگروف اسمیرنوف جهت نرمال‌بودن داده‌های هر سال آزمایش انجام شد و بعد از انجام آزمون بارتلت و اثبات همگن‌بودن واریانس‌ها، داده‌های آزمایش با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS (نسخه ۹/۴) تجزیه واریانس مرکب شدند. برای مقایسه میانگین در سطح پنج درصد اثرات متقابل از رویه برش‌دهی استفاده شد.

۳. نتایج و بحث

۳.۱. مقاومت روزنه‌ای

نتایج تجزیه مرکب داده‌ها نشان داد که اثر ساده سال در سطح پنج درصد و اثرات ساده آبیاری، محلول‌پاشی و ژنوتیپ در سطح یک درصد بر صفت مقاومت روزنه‌ای معنی‌دار بود. اثر متقابل سال × آبیاری در سطح یک درصد و اثرات متقابل آبیاری × محلول‌پاشی و آبیاری × ژنوتیپ نیز در سطح پنج درصد بر صفت مقاومت روزنه‌ای معنی‌دار بود (جدول ۳). در شرایط آبیاری کامل کم‌ترین مقاومت روزنه‌ای در محلول‌پاشی ترکیبی سولفات‌روی و منگنز (۱۷/۸۳) ثانیه بر سانتی‌متر) و سولفات‌منگنز (۱۸/۴۵) ثانیه بر سانتی‌متر) حاصل شد که نسبت به شاهد به‌ترتیب ۱۲ و ۹ درصد کاهش داشت. در شرایط قطع آبیاری، تیمار شاهد با ۲۵/۷۲ ثانیه بر سانتی‌متر بیش‌ترین مقاومت روزنه‌ای را داشت، هرچند تفاوتی میان تیمارها از لحاظ آماری مشاهده نشد (جدول ۴).

تنش خشکی در سال اول و دوم زراعی به‌ترتیب موجب افزایش ۲۷/۸۳ و ۲۲/۵۱ درصدی مقاومت روزنه‌ای برگ‌ها شد (جدول ۵). کاهش میزان مقاومت روزنه‌ای در سال دوم را می‌توان به افزایش بارندگی و رطوبت قابل‌دسترس نسبت داد که سبب کاهش شدت تنش وارده به گیاه گردیده است. مقایسه میانگین برهم‌کنش آبیاری × ژنوتیپ نشان داد که در شرایط آبیاری

کامل، ژنوتیپ نیما (۱۹/۴۵ ثانیه بر سانتی‌متر) بیش‌ترین مقاومت روزنه‌ای را داشت و کم‌ترین مقاومت روزنه‌ای به رقم نیلوفر (۱۸/۵ ثانیه بر سانتی‌متر) تعلق داشت، درحالی‌که در شرایط قطع آبیاری، بیش‌ترین مقاومت روزنه‌ای به ژنوتیپ KS7 با ۲۶/۳۴ ثانیه بر سانتی‌متر تعلق گرفت که نسبت به شاهد پنج درصد افزایش داشت (جدول ۶). مقاومت روزنه‌ای در شرایط قطع آبیاری در همه ژنوتیپ‌ها نسبت به شرایط آبیاری کامل بیش‌تر بود، این افزایش در شرایط تنش خشکی به‌علت بسته‌شدن روزنه‌ها می‌باشد. تنش خشکی در ارقام کلزا باعث افزایش مقاومت روزنه‌ای می‌شود (Khayat Moghadam *et al.*, 2021a) و با بسته‌شدن روزنه‌ها و در نتیجه کاهش دسترسی به CO² در مزوفیل منجر به کاهش فتوسنتز گیاه می‌شود (Heidari, 2015).

جدول ۳. نتایج تجزیه مرکب محلول‌پاشی سولفات روی و منگنز بر عملکرد و صفات فیزیولوژیکی ژنوتیپ‌های کلزا تحت شرایط قطع آبیاری

میانگین مربعات								
منابع تغییرات	درجه آزادی	مقاومت روزنه‌ای	کربوهیدرات محلول برگ	پرویلین	کلروفیل کل	مغزنی نسبی آب برگ	درصد روغن	عملکرد دانه
سال	۱	۱۰۳/۳۶*	۸۷/۴۸**	۵۱۱/۲۹**	۲/۴۸**	۳۵۷/۸۱**	۱۲/۴۳ns	۹۳۶۹۰۵**
سال (تکرار)	۴	۴/۴۳	۹/۴۲	۴/۹۱	۰/۰۲	۸۹/۰۷	۵/۸۲	۵۹۳۳۲۹/۷
آبیاری	۱	۱۵۰۲/۲۱*	۱۹۶۲/۴۹**	۱۲۴۳/۶۲**	۱۴/۳۵**	۵۲۲۶/۶۹**	۴۷۶/۵۱**	۱۱۲۹۲۱۸۶/۷**
سال × آبیاری	۱	۳۷/۲۳**	۲۶/۶۶**	۶۰/۴۰**	۰/۶۹**	۱۶۵/۲۳**	۷/۲۳ns	۲۶۷۲۳۹۹/۴**
محلول‌پاشی	۳	۱۵/۳۴**	۲۹/۷۸**	۳۱/۴۶**	۰/۲۳**	۱۹۰/۰۷**	۵۴/۹۵**	۳۱۶۷۹۳۵/۳**
سال × محلول‌پاشی	۳	۰/۵۲ns	۰/۵۲ns	۰/۸۳ns	۰/۰۰۶ns	۹/۸۵ns	۰/۱۹ns	۳۱۹۷۲/۷ns
محلول‌پاشی × آبیاری	۳	۸/۲۶**	۲۰**	۷/۲۵**	۰/۰۰۸ns	۳۲/۸۶ns	۱۷/۲۷**	۳۰۵۹۶/۶ns
سال × محلول‌پاشی × آبیاری	۳	۱/۵۳۴ns	۰/۶۴ns	۱/۶۷ns	۰/۰۰۰۸ns	۱/۲۰ns	۰/۳۶ns	۳۳۴۱۶/۸ns
سال × آبیاری × محلول‌پاشی (تکرار)	۲۸	۲/۵۷	۶/۳۰	۱/۲۰	۰/۰۲	۱۲/۸۷	۲/۱۴	۳۱۵۹۴۰
ژنوتیپ	۲	۱۱/۷۵**	۴۵/۴۶**	۳۹/۵۷**	۰/۳۳**	۲۳/۱۷*	۴/۳۹ns	۳۰۳۹۸۱۳/۱**
سال × ژنوتیپ	۲	۰/۹۸ns	۰/۵۴ns	۳/۳۲ns	۰/۰۰۵ns	۲/۲۲ns	۰/۱۷ns	۱۶۶۱/۴ns
آبیاری × ژنوتیپ	۲	۶/۳۷*	۹۷/۴۴**	۲۱/۲۵**	۰/۱۱**	۲۵/۸۱*	۳/۸۷ns	۲۳۴۱۲۸۶/۳**
سال × آبیاری × ژنوتیپ	۲	۳/۵۵ns	۱/۸۴ns	۸/۱۴**	۰/۰۵*	۸/۴۸ns	۰/۰۱ns	۶۹۰۶۵/۲ns
محلول‌پاشی × ژنوتیپ	۶	۱۰/۸۴ns	۱/۵۴ns	۰/۲۲ns	۰/۰۰۱ns	۴/۴۴ns	۰/۰۶ns	۱۷۷۶۰/۹ns
سال × محلول‌پاشی × ژنوتیپ	۶	۲/۳۶ns	۰/۰۷ns	۰/۰۶ns	۰/۰۰۰۱ns	۳/۹۵ns	۰/۰۴ns	۲۱۲۰۳ns
آبیاری × محلول‌پاشی × ژنوتیپ	۶	۲/۲۰ns	۳/۲۷ns	۰/۸۵ns	۰/۰۰۲ns	۲/۱۴ns	۰/۰۳ns	۵۳۵۱/۹ns
سال × آبیاری × محلول‌پاشی × ژنوتیپ	۶	۱/۱۹ns	۱/۰۹ns	۲/۰۳ns	۰/۰۰۴ns	۳/۰۵ns	۰/۳۷ns	۱۹۵۹۳/۶ns
خطا	۶۴	۲	۴/۵۶	۱/۱۶	۰/۰۱۵	۶/۹۸	۱/۸۳	۱۳۶۷۹۲/۸
ضریب تغییرات (%)		۶/۳۵	۶/۹۵	۵/۰۶	۸/۹۸	۳/۰۸	۳/۲۷	۹/۲۰

ns و ** و *** به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال پنج و یک درصد و عدم معنی‌داری.

جدول ۴. مقایسه میانگین برهم‌کنش دوگانه آبیاری × محلول‌پاشی بر صفات موردبررسی در ژنوتیپ‌های کلزا

آبیاری	محلول‌پاشی	پرویلین (μmolg ⁻¹ FW)	مقاومت روزنه‌ای (S/cm)	کربوهیدرات محلول برگ (mg.g.FW)	درصد روغن (%)
آبیاری کامل	شاهد	۱۱/۸۱±۰/۴۵ ab	۲۰/۲۹±۰/۸۹ a	۲۵/۱۳±۰/۵۳ b	۴۲/۶۱±۰/۲۷ b
	ZnSO ₄	۱۰/۸۴±۰/۳۶ c	۱۹/۶۶±۰/۵۱ a	۲۷/۷۴±۰/۷۵ a	۴۳/۰۷±۰/۳۴ ab
	MnSO ₄	۱۲/۳۰±۰/۴۷ a	۱۸/۴۵±۰/۵۱ b	۲۶/۲۸±۰/۵۴ b	۴۳/۴۷±۰/۳۱ ab
	ZnSO ₄ + MnSO ₄	۱۱/۲۹±۰/۳۶ b	۱۷/۸۳±۰/۴۲ b	۲۸/۸۷±۰/۷۶ a	۴۳/۹۵±۰/۳۷ a
	LSD	۰/۴	۱/۰۱	۱/۳۴	۰/۸۹
قطع آبیاری از مرحله گلدهی به بعد	شاهد	۱۶/۹۲±۰/۶۷ b	۲۵/۷۲±۰/۶۶ a	۳۴/۴۱±۰/۴۷ a	۳۷/۶۷±۰/۲۷ b
	ZnSO ₄	۱۵/۹۳±۰/۷۷ c	۲۵/۵۲±۰/۵۸a	۳۴/۳۴±۰/۵۲ a	۳۸/۳۳±۰/۳۲ b
	MnSO ₄	۱۹/۰۳±۰/۷۶ a	۲۵/۶۵±۰/۹۱ a	۳۴/۰۶±۰/۵ a	۴۱/۰۳±۰/۲۸ a
	ZnSO ₄ + MnSO ₄	۱۷/۸۷±۰/۸۱ b	۲۵/۱۷±۰/۷۳ a	۳۴/۷۴±۰/۷۴ a	۴۱/۵۲±۰/۳۱ a
	LSD	۰/۹۴	۰/۷۲	۱/۶۶	۰/۸۱

در هر ستون و برای هر عامل، میانگین‌هایی که دارای حروف مشابه هستند، بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

جدول ۵. مقایسه میانگین برهم کنش دوگانه سال × آبیاری بر صفات مورد بررسی در ژنوتیپ‌های کلزا

سال	آبیاری	مقاومت روزنه‌ای (S/cm)	محتوای نسبی آب برگ (%)	کربوهیدرات محلول برگ (mg.g.FW)	عملکرد دانه (kg/ha)
سال اول	آبیاری کامل	۱۹/۳۹±۰/۴۴ b	۹۱/۲۲±۰/۶۵ a	۳۷/۳۵±۰/۵۷ b	۴۷۸۴/۵±۹۵/۵ a
	قطع آبیاری از مرحله گلدهی به بعد	۲۶/۸۷±۰/۸۵ a	۷۷/۰۳±۰/۷۷ b	۳۵/۶۰±۰/۳۴ a	۲۷۴۰/۹۱±۸۵/۱ b
	LSD	۴/۰۳	۹/۱۷	۱/۳	۳۲۱/۲۴
سال دوم	آبیاری کامل	۱۸/۷۲±۰/۵۶ b	۹۲/۲۳±۰/۵۶ a	۲۶/۶۶/۴±۰/۴۵ b	۵۰۱۹/۴±۹۲/۴ a
	قطع آبیاری از مرحله گلدهی به بعد	۲۴/۱۶±۰/۹۲ a	۸۲/۲۳±۰/۷۳ b	۳۳/۱۸±۰/۳۵ a	۲۵۲۰/۷۳±۹۳/۲ b
	LSD	۳/۲۵	۷/۵۵	۱/۶۳	۳۸۲/۳

در هر ستون و برای هر عامل، میانگین‌هایی که دارای حروف مشابه هستند، بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

جدول ۶. مقایسه میانگین برهم کنش دوگانه آبیاری × ژنوتیپ بر صفات مورد بررسی در ژنوتیپ‌های کلزا

آبیاری	ژنوتیپ	مقاومت روزنه‌ای (S/cm)	محتوای نسبی آب برگ (%)	کربوهیدرات محلول برگ (mg.g.FW)	عملکرد دانه (kg/ha)
آبیاری کامل	NilooFar	۱۸/۵±۰/۳۱ b	۹۳/۱۶±۰/۶۴ a	۲۹/۱۱±۰/۵۵ a	۵۲۶۱/۵۷±۹۵ a
	KS7	۱۹/۲۱±۰/۳۴ ab	۹۱/۴۴±۰/۷۷ b	۲۷/۵۱±۰/۵۱ b	۴۷۹۸/۳۹±۱۰۸ b
	NIMA	۱۹/۴۵±۰/۲۲ a	۹۰/۵۹±۰/۷۴ b	۲۴/۳۹±۰/۴ c	۴۶۴۵/۸۹±۱۰۴ b
	LSD	-/۵۷	۱/۴۷	۱/۱۶	۳۱۸/۵۴
قطع آبیاری از مرحله گلدهی به بعد	NilooFar	۲۵/۰۷±۰/۵۱ b	۷۹/۸۵±۱/۰۳ a	۳۳/۹۸±۰/۳۷ a	۳۲۸۱/۹۵±۱۳۶ b
	KS7	۲۶/۳۴±۰/۴۴ a	۷۹/۰۴±۱/۰۸ a	۳۴/۳۱±۰/۳۵ a	۲۷۳۸/۸۷±۱۱۹ c
	NIMA	۲۵/۱۴±۰/۳۷ b	۸۰/۱۵±۱/۱۲ a	۳۴/۸۸±۰/۶۸ a	۳۳۷۱/۶۶±۱۱۴ a
	LSD	-/۷۳	۲/۰۱	۱/۴۴	۹۷/۵

در هر ستون و برای هر عامل، میانگین‌هایی که دارای حروف مشابه هستند، بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

۲.۳. کربوهیدرات محلول برگ

جدول تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که اثرات ساده سال، آبیاری، محلول‌پاشی و ژنوتیپ در سطح یک درصد بر صفت کربوهیدرات محلول برگ معنی‌دار بود. برهم‌کنش سال × آبیاری و آبیاری × محلول‌پاشی در سطح پنج درصد و آبیاری × ژنوتیپ در سطح یک درصد بر صفت کربوهیدرات محلول برگ معنی‌دار بود (جدول ۳). مقایسه میانگین آبیاری × محلول‌پاشی نشان داد که بیش‌ترین میزان کربوهیدرات محلول برگ در شرایط آبیاری کامل در تیمار محلول‌پاشی ترکیبی سولفات روی و منگنز (۲۸/۸۷ میلی‌گرم در گرم وزن تر) حاصل شد که با محلول‌پاشی سولفات روی به‌تنهایی در یک سطح آماری قرار داشت و نسبت به شاهد ۱۴/۸ درصد افزایش را نشان داد. در شرایط قطع آبیاری در مرحله ۵۰ درصد گلدهی، اگرچه بالاترین میزان با ۳۴/۷۴ میلی‌گرم در گرم وزن تر در ترکیب سولفات روی و منگنز به‌دست آمد، با این‌حال نسبت به دیگر سطوح محلول‌پاشی تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۴). می‌توان اظهار کرد که سولفات روی و منگنز هم‌زمان می‌توانند نقش مهمی در افزایش کربوهیدرات محلول برگ داشته باشد. بررسی برهم‌کنش سال × آبیاری نشان داد در سال اول و دوم زراعی، بالاترین میزان کربوهیدرات محلول برگ به‌ترتیب با میانگین ۳۵/۶۰ و ۳۳/۱۸ میلی‌گرم در گرم وزن تر در شرایط قطع آبیاری در مرحله ۵۰ درصد گلدهی مشاهده شد (جدول ۵). کربوهیدرات محلول برگ هم‌چون پرولین در شرایط کم‌آبی در برگ‌ها افزایش می‌یابد، تنش خشکی در سال اول آزمایش موجب افزایش ۲۳/۱۷ درصدی کربوهیدرات محلول برگ گردید، در سال دوم آزمایش نیز به‌دلیل شرایط محیطی مناسب‌تر ۱۹/۶۵ درصد افزایش یافت، که این افزایش نسبی به سال اول کم‌تر بود (جدول ۶). بررسی تأثیر سطوح آبیاری بر میزان کربوهیدرات محلول برگ ژنوتیپ‌های متفاوت کلزا نشان داد، در شرایط آبیاری کامل، رقم نیلوفر بیش‌ترین میزان کربوهیدرات محلول برگ را دارا بود که نسبت به شاهد ۱۹ درصد کاهش داشت، درحالی‌که در شرایط تنش خشکی از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری میان ژنوتیپ‌های کلزا مشاهده نشد، با این‌حال بالاترین میزان کربوهیدرات محلول برگ با ۳۴/۸۸ میلی‌گرم در گرم وزن تر در ژنوتیپ نیما به‌دست آمد (جدول ۶).

با توجه به نقش منگنز در افزایش توان مقاومت گیاه به تنش خشکی، محلول‌پاشی آن با بهبود شرایط رشد گیاه در این شرایط، باعث کاهش میزان کربوهیدرات محلول برگ شد. این کاهش به دلیل عدم تجزیه پروتئین‌ها و دیگر مواد سلولی می‌باشد، هرچند این کاهش از لحاظ آماری معنی‌دار نبود. کربوهیدرات‌ها به‌عنوان تنظیم‌کننده‌های اسمزی نقش اصلی در متابولیسم گیاه دارند و در واکنش به تنش‌های غیرزنده شرکت می‌کنند. اثر تنش خشکی روی کربوهیدرات‌ها به گونه و بافت گیاهی بستگی دارد (Boroujerdnia *et al.*, 2016). تنش خشکی توانست میزان قندهای محلول گلوکز، مانوز و راموز در بافت‌های ارقام کلزا افزایش و در رقم‌های مختلف، میزان متفاوتی را نشان دهد (Mirzaee *et al.*, 2013). کربوهیدرات محلول برگ به‌واسطه حفظ آماس در برگ‌های تحت تنش، از دهیدراسیون پروتئین‌ها و غشاهای سلولی جلوگیری می‌کند (Sevanto, 2018). گزارش شده که تجمع کربوهیدرات محلول نتیجه برخی واکنش‌های متابولیک است که در نتیجه باعث اختلال در تشکیل و یا انتقال فرآورده‌های فتوسنتزی برگ می‌شود که در نهایت منجر به ممانعت از فتوسنتز در شرایط تنش خشکی می‌شود (Xu *et al.*, 2013).

۳.۳. پرولین

نتایج تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که اثر سال، آبیاری، محلول‌پاشی و ژنوتیپ بر صفت پرولین برگ در سطح یک درصد معنی‌دار بود. اثر متقابل سال × آبیاری، آبیاری × محلول‌پاشی و آبیاری × ژنوتیپ و همچنین اثر متقابل سه‌گانه سال × آبیاری × ژنوتیپ بر صفت پرولین برگ نیز در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). در شرایط آبیاری کامل، بیش‌ترین میزان پرولین برگ (۱۲/۳۰ میکرومول در گرم وزن تر)، در محلول‌پاشی سولفات منگنز به‌دست آمد، به‌طوری‌که سولفات منگنز موجب افزایش چهار درصدی پرولین نسبت به تیمار شاهد (۱۱/۸۱ میکرومول در گرم وزن تر) شد (جدول ۴). در شرایط قطع آبیاری در مرحله ۵۰ درصد گلدهی بیش‌ترین میزان این صفت نیز در محلول‌پاشی سولفات منگنز (۱۹/۰۳ میکرومول در گرم وزن تر) حاصل شد که نسبت به شاهد (۱۶/۹۲ میکرومول در گرم وزن تر) افزایش ۱۲ درصدی داشت (جدول ۴). به‌طور کلی، محلول‌پاشی در جهت بهبود تنش خشکی عمل می‌کند. اعمال تنش منجر به افزایش پرولین در تمامی ژنوتیپ‌ها در دو سال زراعی شد. به‌طوری‌که در سال اول زراعی در شرایط آبیاری کامل، بیش‌ترین میزان پرولین در ژنوتیپ نیما (۱۳/۹۸ میکرومول در گرم وزن تر) به‌دست آمد، در حالی‌که کم‌ترین میزان پرولین با ۱۱/۳۴ میکرومول در گرم وزن تر در رقم نیلوفر حاصل شد که نسبت به شاهد ۱۹ درصد کاهش داشت (جدول ۷). در سال اول زراعی و در شرایط قطع آبیاری نیز بیش‌ترین مقدار پرولین در ژنوتیپ KS7 (۲۱/۱۷ میکرومول در گرم وزن تر) به‌دست آمد که نسبت به شاهد ۱۱ درصد افزایش داشت (جدول ۷). در سال دوم زراعی در آبیاری کامل، بیش‌ترین میزان پرولین در ژنوتیپ KS7 با میانگین ۱۰/۸۲ میکرومول در گرم وزن تر به‌دست آمد که نسبت به شاهد پنج درصد افزایش داشت (جدول ۷). همچنین در سال دوم زراعی به همراه قطع آبیاری، ژنوتیپ KS7 (۱۶/۸۳ میکرومول در گرم وزن تر) بیش‌ترین میزان پرولین را داشت که نسبت به شاهد ۱۴ درصد افزایش داشت (جدول ۷).

افزایش میزان پرولین در اثر تنش خشکی در نخود (El-Saadony *et al.*, 2017)، سورگوم (Amoah & Antwi- Berko, 2020)، کلزا (Farahani *et al.*, 2020) و گندم (Faraji & Sepehri, 2020) گزارش شده است. به‌دلیل نقش پرولین در تنظیم اسمزی میزان آن در شرایط قطع آبیاری افزایش می‌یابد، این امر موجب حفظ تورژانس سلول که نقش حفاظت گیاه در شرایط تنش خشکی را برعهده دارد می‌شود (Mirzaee *et al.* 2013; Khayat Moghadam *et al.*, 2021b). پژوهش‌گران بسیاری علت افزایش تجمع پرولین در نتیجه محلول‌پاشی روی و منگنز را به نقش این عناصر در فعال‌سازی آنزیم‌های تجزیه‌کننده پروتئین و تبدیل آن‌ها به اسیدآمینه پرولین نسبت دادند (Babaeian *et al.*, 2011; Waraich *et al.*, 2012).

جدول ۷. مقایسه میانگین برهم کنش سه گانه سال × آبیاری × ژنوتیپ بر صفات مورد بررسی در ژنوتیپ های کلزا

سال	آبیاری	ژنوتیپ	پرویلین (μmolg ⁻¹ FW)	کلروفیل کل (mg/g.FW)
سال اول	آبیاری کامل	Nilofar	۱۱/۳۴±۰/۱۷ c	۱/۷۴±۰/۰۵ b
		KS7	۱۳/۰۷±۰/۳۱ b	۱/۵۹±۰/۰۲ b
		NIMA	۱۳/۹۸±۰/۲۷ a	۱/۵۴±۰/۰۲ a
LSD			۰/۴۵	۰/۰۹
سال دوم	قطع آبیاری از مرحله گلدهی به بعد	Nilofar	۱۹/۶۸±۰/۴ b	۰/۹۱±۰/۰۳ b
		KS7	۲۱/۱۷±۰/۰۶ a	۰/۷±۰/۰۴ a
		NIMA	۱۹/۰۴±۰/۰۶ b	۰/۹۶±۰/۰۳ a
LSD			۰/۸۵	۰/۰۸
سال دوم	آبیاری کامل	Nilofar	۹/۸۸±۰/۳۳ b	۱/۸۳±۰/۰۳ b
		KS7	۱۰/۸۲±۰/۳۶ a	۱/۶۹±۰/۰۴ ab
		NIMA	۱۰/۲۷±۰/۳۳ ab	۱/۷۳±۰/۰۴ a
LSD			۰/۶	۰/۱
سال دوم	قطع آبیاری از مرحله گلدهی به بعد	Nilofar	۱۳/۸۰±۰/۴۹ b	۱/۳۳±۰/۰۲ b
		KS7	۱۶/۸۳±۰/۳۹ a	۱/۱۷±۰/۰۳ a
		NIMA	۱۴/۰۸±۰/۴۲ b	۱/۲۷±۰/۰۲ a
LSD			۰/۹۱	۰/۰۶

در هر ستون و برای هر عامل، میانگین هایی که دارای حروف مشابه هستند، براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی داری ندارند.

۳.۴. کلروفیل کل

میزان کلروفیل کل برگ در اثرات ساده سال، آبیاری، محلول پاشی و ژنوتیپ بر کلروفیل برگ در سطح یک درصد معنی دار بود. اثر متقابل سال × آبیاری و آبیاری × ژنوتیپ در سطح یک درصد و هم چنین اثر متقابل سه گانه سال × آبیاری × ژنوتیپ در سطح پنج درصد بر صفت کلروفیل کل برگ معنی دار بود (جدول ۳). در سال اول زراعی، رقم نیلوفر (۱/۷۴) میلی گرم در گرم وزن تر) در تیمار آبیاری کامل بیشترین مقدار کلروفیل کل را داشت که نسبت به شاهد ۸ درصد افزایش داشت (جدول ۷) و در شرایط قطع آبیاری نیز بیشترین کلروفیل کل در رقم های نیلوفر (۰/۹۱) میلی گرم در گرم وزن تر) و نیما (۰/۹۶) میلی گرم در گرم وزن تر) به دست آمد که در یک گروه آماری قرار داشتند (جدول ۷). در سال دوم زراعی، بیشترین میزان کلروفیل کل به رقم نیلوفر (۱/۸۳) میلی گرم در گرم وزن تر) در شرایط آبیاری کامل تعلق گرفت که نسبت به شاهد شش درصد افزایش داشت و ژنوتیپ های نیلوفر و نیما به ترتیب با میانگین ۱/۳۳ و ۱/۲۷ میلی گرم در گرم وزن تر بیشترین میزان کلروفیل کل را داشتند و در یک گروه آماری قرار گرفتند (جدول ۷). به نظر می رسد بارندگی بیش تر در سال دوم به همراه عدم تنش خشکی، در کنار ویژگی های ژنتیکی رقم نیلوفر علت بالاتر بودن مقدار کلروفیل کل آن باشد. بالاترین مقدار کلروفیل کل در محلول پاشی ترکیبی سولفات روی و منگنز با میانگین ۱/۴۷ میلی گرم در گرم وزن تر مشاهده شد که نسبت به شاهد (۱/۲۱) میلی گرم در گرم وزن تر) افزایش ۲۱ درصدی داشت. نتایج نشان داد تفاوت معنی داری میان کاربرد جداگانه روی و منگنز نسبت به یکدیگر وجود ندارد، با این حال به نظر می رسد ترکیب هر دو به صورت هم افزایی باعث افزایش مقدار کلروفیل کل شده است (جدول ۸).

جدول ۸. مقایسه میانگین اثر ساده محلول پاشی بر صفات مورد بررسی در ژنوتیپ های کلزا

محلول پاشی	عملکرد دانه (Kg/ha)	محتوای نسبی آب برگ (%)	کلروفیل کل (mg/g.FW)
شاهد	۳۶۶۴±۱۷۵ c	۸۳/۲±۱/۱۳ c	۱/۲۱±۰/۰۶ c
ZnSO ₄	۴۰۴۰±۱۹۰ b	۸۴/۴±۱/۳۲ b	۱/۳۶±۰/۰۷ b
MnSO ₄	۳۹۵۹±۱۵۵ b	۸۶/۷±۱/۲۷ b	۱/۳۷±۰/۰۶ b
ZnSO ₄ + MnSO ₄	۴۳۵۲±۲۰۱ a	۸۸/۴±۱/۱۱ a	۱/۴۷±۰/۰۷ a
LSD	۳۷۱/۳	۱/۷۳	۰/۰۶

در هر ستون میانگین هایی که دارای حروف مشابه هستند، براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی داری ندارند.

در شرایط تنش خشکی، با تولید اکسیژن‌های فعال، کلروپلاست تخریب شده و در اثر آن میزان کلروفیل و فتوسنتز برگ به دلیل تجزیه پروتئین‌ها کاهش می‌یابد (Hasan *et al.*, 2018; Aghaie *et al.*, 2018). کاهش مقادیر کلروفیل تحت شرایط خشکی توسط پژوهش‌گر دیگر نیز گزارش شده است (Jamshidi *et al.*, 2012). گیاهان مختلف و حتی ارقام مختلف یک گیاه، پاسخ‌های متفاوتی به تنش‌های محیطی می‌دهند که ناشی از پتانسیل ژنتیکی گیاهان می‌باشد. در واقع گیاهان توانایی‌های متفاوتی در استفاده از عوامل محیطی دارند. در این میان، تنش‌های زنده و غیرزنده نیز باعث افزایش و کاهش این توانایی‌ها می‌شود. از آنجایی که ژنوتیپ KS7 از اختلالات ظاهری برخوردار بود، می‌توان این‌گونه استنباط کرد که کم‌تر بودن غلظت کلروفیل این ژنوتیپ شاید ناشی از اختلالات ژنتیکی و پتانسیل پایین این رقم باشد. اگرچه قطع آبیاری باعث کاهش غلظت کلروفیل کل در هر سه ژنوتیپ شد، اما بین رقم‌های نیلوفر و نیما تفاوت معنی‌داری وجود نداشت، اما ژنوتیپ KS7 که با اختلاف معنی‌داری غلظت کلروفیل کم‌تری نسبت به دو رقم دیگر داشت، که خود دلیلی بر کم‌تر بودن پتانسیل ژنتیکی این رقم نسبت به دو رقم دیگر است. بررسی پژوهش‌ها نشان می‌دهد محلول‌پاشی عناصر روی و منگنز منجر به افزایش مقدار کلروفیل برگ شد، به نظر می‌رسد این افزایش به دلیل نقش مؤثر عناصر روی و منگنز در فعالیت‌های متابولیسمی سلولی هم‌چون فعالیت آنزیم‌ها، کوآنزیم‌ها، پروتئین‌ها و ... باشد (Ghorbani *et al.*, 2019; Kalantar & Dezfouli, 2019). کمبود عنصر روی سبب به هم‌ریختگی سوخت‌وساز قندها و پروتئین‌ها می‌شود و در نهایت فعالیت آنزیم‌های کربنیک آنهیدراز و فروکتوز ۱ و ۶ بیس فسفاتاز به شدت کاهش می‌یابد (Balaji *et al.*, 2014). منگنز در فعال کردن آنزیم‌های فتوسنتزی دکربوکسیلاز و دهیدروژناز مورد نیاز است. در فتوسیستم دو به چهار اتم آن نیاز است و بخشی از مجموعه آزادکننده اکسیژن است. گزارش شده که تیمار منگنز باعث افزایش کلروفیل برگ می‌شود و در نهایت موجب بهبود فعالیت فتوسنتزی می‌شود (Obaid & Al-Hadethi, 2013).

۵.۳. محتوای نسبی آب برگ

تجزیه واریانس آزمایش نشان داد که اثرات ساده آبیاری و محلول‌پاشی در سطح یک درصد و ژنوتیپ در سطح پنج درصد بر صفت محتوای نسبی آب برگ معنی‌دار بود. اثر متقابل سال × آبیاری در سطح یک درصد و برهم‌کنش آبیاری × ژنوتیپ در سطح پنج درصد بر صفت محتوای نسبی آب برگ معنی‌دار بود (جدول ۳). بررسی اثر تیمار محلول‌پاشی بر این صفت نشان داد بالاترین میزان محتوای آب نسبی برگ با ۸۸/۴۰ درصد در محلول‌پاشی ترکیبی سولفات‌روی و منگنز به دست آمد که نسبت به شاهد ۶/۲۵ درصد افزایش یافت (جدول ۸). عنصر روی نقش مهمی در تنظیم میزان بازبودن روزنه‌ها دارد. از آنجایی که این عنصر در نگهداری پتاسیم در سلول‌های محافظ روزنه نقش دارد قادر است از طریق کاهش تلفات آب برگ موجب افزایش محتوای آب نسبی برگ شود (Weisany *et al.*, 2011). کاهش میزان پتاسیم در سلول‌های محافظ روزنه ممکن است به افزایش خروج پتاسیم نسبت به جریان آن به داخل، از طریق نشت از غشای سلولی مربوط باشد و به دلیل عدم تأمین میزان کافی روی، یکپارچگی غشا از بین رفته و به دنبال آن محتوای نسبی آب برگ نیز کاهش می‌یابد (Weisany *et al.*, 2011). گزارش شده است که بوته‌های آفتابگردانی که میزان روی بیش‌تری دریافت کرده‌اند از محتوای نسبی آب برگ بالاتری برخوردار بودند (Shahri *et al.*, 2012). برهم‌کنش سال × آبیاری نشان داد که تنش خشکی اعمال شده در سال اول موجب کاهش ۱۵/۵ درصدی و در سال دوم ۱۰/۷ درصدی محتوای آب نسبی برگ نسبت به شاهد شد که کاهش کم‌تر در سال دوم، می‌تواند به دلیل افزایش بارندگی و کاهش اثرات تنش خشکی نسبت به سال اول زراعی باشد (جدول ۵). برهم‌کنش سطوح آبیاری × ژنوتیپ نیز نشان داد در شرایط آبیاری کامل رقم نیلوفر با ۹۳/۱۶ درصد محتوای آب نسبی برگ بالاترین میزان را برخوردار بود که نسبت به شاهد ۲/۸

درصد افزایش داشت، درحالی‌که در تیمار قطع آبیاری در مرحله ۵۰ درصد گلدهی، همه ژنوتیپ‌های مورد مطالعه که از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری نسبت به یکدیگر نداشتند (جدول ۶). گیاهانی که تحت شرایط تنش خشکی قرار می‌گیرند، فضای بین سلولی و آب در پیکره خود را از طریق افزایش ترکیبات تنظیم‌کننده اسمزی درون بافت‌ها به حداقل می‌رسانند تا آب از خاک با نیروی بیش‌تری وارد آن‌ها شود که این امر موجب کاهش محتوای آب نسبی در شرایط تنش خشکی می‌شود (Khan *et al.*, 2007). به‌نظر می‌رسد بین محتوای نسبی آب برگ و رطوبت خاک رابطه مستقیم وجود دارد، به‌طوری‌که با کاهش رطوبت خاک و ایجاد تنش، محتوای نسبی آب برگ کاهش می‌یابد. کاهش مقدار آب قابل‌دسترس و جذب‌شده در شرایط تنش خشکی قادر است محتوای نسبی آب برگ ارقام کلزا را کاهش دهد و این کاهش در ارقام مختلف، متفاوت است (Aghdam *et al.*, 2019; Khayat Moghadam *et al.*, 2021a).

۳.۶. درصد روغن

جدول تجزیه واریانس آزمایش نشان داد که اثرات ساده آبیاری و محلول‌پاشی و هم‌چنین اثر متقابل آبیاری × محلول‌پاشی بر درصد روغن در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). بررسی‌ها نشان داد تنش خشکی در شرایط ۵۰ درصد گل‌دهی کلزا، نسبت به شرایط آبیاری کامل درصد روغن دانه را کاهش داد، با این‌حال محلول‌پاشی عناصر روی و منگنز این شرایط را نسبت به کنترل بهبود دادند. در شرایط آبیاری کامل بیش‌ترین درصد روغن در تیمار محلول‌پاشی ترکیبی سولفات روی و منگنز (۴۳/۹ درصد) مشاهده شد که نسبت به شاهد سه درصد افزایش داشت (جدول ۴). در شرایط قطع آبیاری، بیش‌ترین درصد روغن در تیمار محلول‌پاشی ترکیبی سولفات روی و منگنز با میانگین ۴۱/۵ درصد به‌دست آمد که با تیمار سولفات روی در یک سطح آماری قرار داشت و نسبت به شاهد ۱۰ درصد افزایش داشت. درصد روغن صفتی ژنتیکی می‌باشد که البته تا حدودی تحت تأثیر شرایط محیطی نیز قرار می‌گیرد. در واقع شرایط تنش باعث کاهش در جذب عناصر غذایی و اختلال در جذب کربن در گیاه می‌شود و این امر موجب کاهش میزان روغن در دانه می‌شود که می‌توان با محلول‌پاشی عناصر غذایی تا حدودی این کمبود را تعدیل کرد. محلول‌پاشی روی و منگنز با افزایش مقاومت کلزا به تنش خشکی و بهبود فرایندهای سلولی هم‌چون فتوسنتز می‌تواند موجب افزایش درصد روغن دانه شود (Shahsavari, 2019). سولفات روی و منگنز نقش کلیدی در متابولیسم اسیدهای چرب به‌واسطه آنزیم‌های مرتبط در مسیر اسیدهای چرب دارند، بنابراین افزایش آن‌ها در مرحله تنش خشکی می‌تواند دلیل بهبود درصد روغن دانه باشد (Candan *et al.*, 2018). گزارش شده مصرف روی و منگنز موجب افزایش ۸/۷ و ۱۲/۴ درصدی میزان روغن در گلرنگ شد و تأثیر این عناصر در شرایط تنش خشکی نسبت به شرایط نرمال آبیاری بر درصد روغن، ملموس‌تر بود (Movahhedy-Dehnavy *et al.*, 2009).

۳.۷. عملکرد دانه

بررسی تأثیر تیمارهای آزمایش بر عملکرد دانه نشان داد که اثر سال در سطح پنج درصد و اثرات ساده آبیاری، محلول‌پاشی و ژنوتیپ در سطح یک درصد بر عملکرد دانه کلزا معنی‌دار بود. بررسی برهم‌کنش سال × آبیاری و آبیاری × ژنوتیپ نیز در سطح یک درصد بر این صفت معنی‌دار بود (جدول ۳). عملکرد دانه کلزا تحت تأثیر محلول‌پاشی روی، منگنز و ترکیب هر دو نسبت به شاهد به‌ترتیب ۱۰، ۸ و ۱۹ درصد افزایش یافت، به‌طوری‌که بیش‌ترین عملکرد دانه با ۴۳۵۲ کیلوگرم در هکتار در محلول‌پاشی ترکیبی روی و منگنز به‌دست آمد (جدول ۸). قطع آبیاری در سال اول و دوم زراعی به‌ترتیب منجر به کاهش ۴۲/۷ و ۲۹/۸ درصدی نسبت به شاهد شد (جدول ۴). افزایش ۶۱/۲ درصدی بارندگی در

سال دوم نسبت به سال اول (جدول ۱)، باعث این اختلاف درصد کاهش در سال اول و دوم نسبت به شرایط تنش خشکی شد که نشان از محدودیت افزایش عملکرد دانه کلزا با توجه به مقدار رطوبت قابل دسترس دارد، چراکه افزایش بارندگی بیش‌تر موجب بهبود شرایط تنش خشکی می‌شود. در شرایط آبیاری کامل، رقم نیلوفر با میانگین ۵۲۶۱/۵۷ کیلوگرم در هکتار بیش‌ترین عملکرد دانه را داشت که نسبت به ژنوتیپ شاهد ۱۳ درصد عملکرد بیش‌تری داشت (جدول ۶). در شرایط قطع آبیاری نیز ژنوتیپ نیما در شرایط تنش خشکی با میانگین ۳۳۷۱/۶ کیلوگرم در هکتار بیش‌ترین عملکرد دانه را داشت. در شرایط قطع آبیاری رقم نیما به‌علت تسریع در طول دوره رشد و عدم مواجه‌شدن با شرایط دمایی بالای آخر فصل رشد و کم‌آبی، نسبت به دو رقم دیگر دچار افت عملکرد زیادی نشد و از عملکرد بالاتری برخوردار بود. تنش خشکی در مرحله گلدهی موجب کاهش ۳۷/۶، ۴۲/۹ و ۲۷/۴ درصدی عملکرد دانه ژنوتیپ‌های نیلوفر، KS7 و نیما شد (جدول ۶).

اعمال تنش خشکی آخر فصل بر روی عملکرد و اجزای عملکرد در ارقام کلزا تأثیرگذار بود (Khayat Moghadam *et al.*, 2021c). محلول‌پاشی عناصر روی و منگنز تحت تنش خشکی بر رشد کلزا (Khodabin *et al.*, 2020) و گل‌رنگ (Movahhedy-Dehnavy *et al.*, 2009) باعث افزایش عملکرد دانه شد. همچنین گزارش‌شده محلول‌پاشی سولفات‌روی از طریق افزایش اکسین و تنظیم آب گیاه باعث بهبود رشد رویشی، افزایش فتوسنتز و افزایش عملکرد گیاه می‌شود (Qaswar *et al.*, 2017). منگنز در پاسخ به تنش‌های غیرزنده، با ایجاد سوپر اکسید دیسموتاز در سطح رونویسی برای مواجهه با تولید گونه‌های فعال اکسیژن و تحریک پروتئین‌های وابسته به منگنز منجر به حفظ یکپارچگی سلولی می‌شود (Ye *et al.*, 2019). توضیح محتمل در این زمینه، بهبود صفات فیزیولوژیکی و اجزای عملکرد با کاربرد روی است. روی اثر مثبتی بر فرایند فتوسنتزی برگ‌ها دارد و سبب انتقال بهتر مواد فتوسنتزی می‌شود، از سوی دیگر، شکل‌گیری اندام جنسی نر و ماده و گرده‌افشانی در شرایط کمبود روی مختل می‌شود و همچنین در این شرایط کاهش ایندول استیک اسید منجر به کاهش عملکرد دانه می‌شود (Yang *et al.*, 2009).

۴. نتیجه‌گیری

قطع آبیاری از مرحله گلدهی به بعد سبب کاهش عملکرد دانه، درصد روغن، محتوای نسبی آب و کلروفیل کل برگ شد. محلول‌پاشی سولفات‌روی و منگنز با تأثیر مثبت بر صفات محتوای نسبی آب برگ، کلروفیل، کربوهیدرات محلول و مقاومت روزنه‌ای باعث تعدیل شرایط خشکی در کلزا شد. با توجه به آهکی بودن اکثر خاک‌های زراعی در ایران و مشکل جذب عناصر کم‌مصرف از خاک، محلول‌پاشی از طریق برگ می‌تواند منجر به افزایش عملکرد کلزا شود. همچنین نتایج نشان داد که رقم نیلوفر در شرایط آبیاری کامل مناسب شرایط آب‌وهوایی مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌باشد، اما در زمانی که پیش‌بینی‌های آب و هوایی نشان از کم‌آبی در بهار دارد، ژنوتیپ نیما با توجه به کوتاه‌بودن دوره رشد، رقم مناسبی خواهد بود.

۵. تشکر و قدردانی

از زحمات استادان و کارکنان محترم بخش دانه‌های روغنی مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج که در انجام این مهم یاری کردند، تشکر و قدردانی می‌گردد.

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع مورد استفاده

- Aghaie, P., Tafreshi, S. A. H., Ebrahimi, M. A., & Haerinasab, M. (2018). Tolerance evaluation and clustering of fourteen tomato cultivars grown under mild and severe drought conditions. *Scientia Horticulturae*, 232, 1-12.
- Aghdam, A. M., Sayfzadeh, S., Shirani Rad, A. H., Valadabadi, S. A., & Zakerin, H. R. (2019). The assessment of water stress and delay cropping on quantitative and qualitative traits of rapeseed genotypes. *Industrial Crops and Products*, 131, 160-165.
- Al-Barrak, K. M. (2006). Irrigation interval and nitrogen level effects on growth and yield of canola (*Brassica napus* L.). *Scientific Journal of King Faisal University*, 7(1), 87-102.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage. *FAO, Rome*, 300(9), D05109.
- Alloway, B. J. (2008). Zinc in soils and crop nutrition. Published by IZA and IFA. *Brussels, Belgium and Paris, France*, 139.
- Amoah, J. N., & Antwi-Berko, D. (2020). Comparative physiological, biochemical and transcript response to drought in sorghum genotypes. *Biotechnology Journal International*, 1-14.
- Aram, S., Weisany, W., Daliri, M. S., & Mirkalaie, S. A. A. M. (2021). Phenology, physiology, and fatty acid profile of canola (*Brassica napus* L.) under agronomic management practices (direct seeding and transplanting) and zinc foliar application. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21(2), 1735-1744.
- Arnon, D. I. (1949). Copper enzymes in isolated chloroplasts, polyphenoxidase in beta vulgaris. *Plant hysiology*, 24, 1-15.
- Athukorala, A.D. (2021). Solubilization of micronutrients using indigenous microorganisms. *In Microbial Technology for Sustainable Environment*, 365-417. Springer, Singapore.
- Babaeian, M., Tavassoli, A., Ghanbari, A., Esmailian, Y., & Fahimifard, M. (2011). Effects of foliar micronutrient application on osmotic adjustments, grain yield and yield components in sunflower (*Alstar cultivar*) under water stress at three stages. *African Journal of Agricultural Research*, 6(5), 1204-1208.
- Balaji, S., Kalaivani, T., & Rajasekaran, C. (2014). Biosorption of zinc and nickel and its effect on growth of different Spirulina strains. *CLEAN–Soil, Air, Water*, 42(4), 507-512.
- Bates, L. S., Waldren, R. P., & Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 39(1), 205-207.
- Boroujerdnia, M., Bihamta, M., Alami Said, K., & Abdossi, V. (2016). Effect of drought tension on proline content, soluble carbohydrates, electrolytes leakage and relative water content of bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Scientific Journal of Crop Physiology*. I.A.U. Ahvaz. 8(29), 23-41. (In Persian).
- Candan, N., Cakmak, I., & Ozturk, L. (2018). Zinc-biofortified seeds improved seedling growth under zinc deficiency and drought stress in durum wheat. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 181(3), 388-395.
- Diedrick, K. (2010). Manganese fertility in soybean production. *Pioneer Hi-Bred Agronomy Sciences*, 20(14), 23-28.
- El-Saadony, F. M., Nawar, D. A., & Zyada, H. G. (2017). Effect of foliar application with salicylic acid, garlic extract and proline on growth, yield and leaf anatomy of pea (*Pisum sativum* L.) grown under drought stress. *Middle East. Journal of Applied Sciences*, 7(3), 633-650.
- FAO. (2017). Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAOSTAT Data. www.faostat.fao.org.
- Farahani, S., Shahsavari, N., & Mohammadi Arasteh, M. (2020). Effect of potassium sulfate on the physiological characteristics of canola cultivars in late season drought stress conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 43(9), 1217-1228.
- Faraji, J., & Sepehri, A. (2020). Exogenous nitric oxide improves the protective effects of TiO₂ nanoparticles on growth, antioxidant system, and photosynthetic performance of wheat seedlings under drought stress. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20(2), 703-714.

- Ghorbani, P., Eshghi, S., Ershadi, A., Shekafandeh, A., & Razzaghi, F. (2019). The possible role of foliar application of manganese sulfate on mitigating adverse effects of water stress in grapevine. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 50(13), 1550-1562.
- Hamzei, J., & Soltani, J. (2012). Deficit irrigation of rapeseed for water-saving: Effects on biomass accumulation, light interception and radiation use efficiency under different N rates. *Agriculture, ecosystems & environment*, 155, 153-160.
- Hasan, M. M. U., Ma, F., Prodhan, Z. H., Li, F., Shen, H., Chen, Y., & Wang, X. (2018). Molecular and physio-biochemical characterization of cotton species for assessing drought stress tolerance. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(9), 2636.
- Heidari, N. (2015). Effects of drought stress on photosynthesis, its parameters and relative water content of anise (*Pimpinella anisum* L.) *Journal of Plant Research*, 27(5), 829-839. (In Persian).
- Jamshidi, N., Shirani Rad, A. H., Takht chin, F., Nazeri, P., & Ghafari, M. (2012). Evaluation of rapeseed genotypes under drought stress condition. *Journal of Crop Ecophysiology*, 6(3), 323-339. (In Persian).
- Kalantar, A. S., & Dezfouli, A. S. (2019). Effects of foliar application of micronutrients on seed yield and oil quality of canola (*Brassica napus* L. cv. Hyola401) under drought stress conditions. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 21(3). (In Persian).
- Karim, M. R., Zhang, Y. Q., Zhao, R. R., Chen, X. P., Zhang, F. S., & Zou, C. Q. (2012). Alleviation of drought stress in winter wheat by late foliar application of zinc, boron, and manganese. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 175(1), 142-151.
- Khan, A. A. (2017). Canola yield and quality enhanced with sulphur fertilization. *Russian Agricultural Sciences*, 43(2), 113-119.
- Khan, M. A., Ashraf, M. Y., Mujtaba, S. M., Shirazi, M. U., Khan, M. A., Shereen, A., Mumtaz, S., Agil Siddiqui, M. A., & Kaleri, G. M. (2010). Evaluation of high yielding canola type Brassica genotypes/mutants for drought tolerance using physiological indices as screening tool. *Pakistan Journal of Botany*, 42(6), 3807-3816.
- Khayat Moghadam, M. S., Gholami, A., Shirani Rad, A. H., BaradaranFiroozabadi, M., & Abbasdokht, H. (2021a). The effect of Potassium silicate and late-season drought stress on the physiological characters of Canola. *Journal of Crops Improvement*. <https://dx.doi.org/10.22059/jci.2021.306872.2424>. (In Persian).
- Khayat Moghadam, M. S., Shirani Rad, A. H., Baradaran Firoozabadi, M., & Abbasdokht, H. (2021b). The impact of potassium silicate foliar application on some morphological, physiological and biochemical properties of rape genotypes under late seasonal drought stress. *Journal of Plant Research*. (In Persian).
- Khayat Moghadam, M. S., Gholami, A., Shirani Rad, A. H., Baradaran Firoozabadi, M., & Abbasdokht, H. (2021c). Evaluation crop indices of canola spring genotypes in terminal drought stress conditions and foliar application of Potassium silicate. *Journal of Environmental Stresses in Crop Sciences*. <https://dx.doi.org/10.22077/ESCS.2020.2723.1787>. (In Persian).
- Khodabin, G., Tahmasebi-Sarvestani, Z., Shirani Rad, A. H., Modarres-Sanavy, S. A. M., & Bakhshandeh, E. (2020). The effect of withholding irrigation and foliar application of Zn and Mn on yield and eco-physiological characteristics of rapeseed (*Brassica napus* L.). *Iranian Journal of Field Crops Research*, 18(1), 85-100. <https://www.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?id=833280>
- Khodabin, G., Tahmasebi-Sarvestani, Z., Shirani Rad, A. H., Modarres-Sanavy, S. A. M., Hashemi, S. M., & Bakhshandeh, E. (2021). Effect of late-season drought stress and foliar application of ZnSO₄ and MnSO₄ on the yield and some oil characteristics of rapeseed cultivars. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22, 1-13.
- Malakouti, M. J., & Homaeae, M. (2004). Soil fertility of arid and semi-arid regions "Difficulties and solutions". (2nd ed). Tarbiat Modarres University Press, 492.

- Maleki, A., Naderi, A., Naseri, R., Fathi, A., Bahamin, S., & Maleki, R. (2013). Physiological performance of soybean cultivars under drought stress. *Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences*, 2(6), 38-44.
- Mirzaee, M., Moieni, A., & Ghanati, F. (2013). Effect of drought stress on proline and soluble sugar content in canola (*Brassica napus* L.) seedlings. *Iranian Journal of Biology*. (In Persian).
- Obaid, E. A., & Al-Hadethi, M. E. A. (2013). Effect of foliar application with manganese and zinc on pomegranate growth, yield and fruit quality. *Journal of Horticultural Science & Ornamental Plants*, 5(1), 41-45.
- Movahhedy-Dehnavy, M., Modarres-Sanavy, S. A. M., & Mokhtassi-Bidgoli, A. (2009). Foliar application of zinc and manganese improves seed yield and quality of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) grown under water deficit stress. *Industrial Crops and Products*, 30(1), 82-92.
- Qaswar, M., Hussain, S., & Rengel, Z. (2017). Zinc fertilisation increases grain zinc and reduces grain lead and cadmium concentrations more in zinc-biofortified than standard wheat cultivar. *Science of the Total Environment*, 605, 454-460.
- Rashtbari, M., Hossein Ali, A., & Ghorchiani, M. (2020). Effect of vermicompost and municipal solid waste compost on growth and yield of canola under drought stress conditions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 51(17), 2215-2222.
- Rodriguez, D. D., Philips, D. B. S., Rodriguez-García, R., & Angulo-Sánchez, J. L. (2002). Grain yield and fatty acid composition of sunflower seed for cultivars developed under dry land conditions. *Trends in new crops and new uses. American Society for Horticultural Science Press, Alexandria*, 139-142.
- Salehi-Lisar, S. Y., & Bakhshayeshan-Agdam, H. (2016). Drought stress in plants: causes, consequences, and tolerance. In *Drought Stress Tolerance in Plants*, 1, 1-16. Springer, Cham.
- Sevanto, S. (2018). Drought impacts on phloem transport. *Current Opinion in Plant Biology*, 43, 76-81.
- Shahri, Z. B., Zamani, G. R., & Sayyari-Zahan, M. H. (2012). Effect of drought stress and zinc sulfat on the yield and some physiological characteristics of sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Advances in Environmental Biology*, 518-526.
- Shahsavari, N. (2019). Effects of zeolite and zinc on quality of canola (*Brassica napus* L.) under late season drought stress. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 50(9), 1117-1122.
- Tsonev, T., & Cebola Lidon, F. J. (2012). Zinc in plants-an overview. *Emirates Journal of Food & Agriculture (EJFA)*, 24(4).
- Waraich, E. A., Ahmad, R., Halim, A., & Aziz, T. (2012). Alleviation of temperature stress by nutrient management in crop plants: a review. *Journal of soil science and plant nutrition*, 12(2), 221-244.
- Weisany, W., Sohrabi, Y., Heidari, G., Siosemardeh, A., & Ghassemi-Golezani, K. (2011). Physiological responses of soybean (*Glycine max* L.) To zinc application under salinity stress. *Australian Journal of Crop Science*, 5(11), 1441-1447.
- Xu, C., McDowell, N. G., Sevanto, S., & Fisher, R. A. (2013). Our limited ability to predict vegetation dynamics under water stress. *New Phytologist*, 200(2), 298-300.
- Ye, Y., Medina-Velo, I. A., Cota-Ruiz, K., Moreno-Olivas, F., & Gardea-Torresdey, J. L. (2019). Can abiotic stresses in plants be alleviated by manganese nanoparticles or compounds? *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 184, 109671.