University of Birjand

Journal homepage:
https://escs.birjand.ac.ir

تنشهای محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses In Crop Sciences

Vol. 17, No. 1, pp. 31-45 (Spring 2024)

https://dx.doi.org/10.22077/ESCS.2023.5357.2141

Original article

Foliar application of micronutrients and salicylic acid to improve some quality traits and yield of canola (*Brassica napus* L.) under water deficit stress

Y. Mir[1*], H. Khosravi[2], M. Daneshvar[3], A. Ismaili[4]

1. *Ph.D. Graduated, Department of Genetic Engineering and Plant Production, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad. Iran*
2. *Ph.D. Student, Department of Genetic Engineering and Plant Production, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad. Iran*
3. *Assistant professor, Department of Genetic Engineering and Plant Production, Faculty of Agriculture, Lorestan University. Khorramabad, Iran*
4. *Professor, Department of Genetic Engineering and Plant Production, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad. Iran*

Received 2 June 2022; Accepted 4 July 2022

Extended abstract

Introduction

canola (*Brassica napus* L.) is one of the most important oilseed plants that has been ranked third in the oil production after soybeans and oil palm. Drought is seriously the most important factor limiting the growth and production of canola in Iran. By foliar application of micronutrients, plant growth condition can be improved under stress. Salicylic acid (SA) plays an important role in abiotic stress tolerance, and more interests have been focused on SA due to its ability to induce a protective effect on plants under adverse environmental conditions. It is necessary to know the traits related to drought tolerance and their relationship with Seed yield. Due to the important role of roots in the absorption and conduction of water and nutrients, accurate knowledge of the root system and how it is distributed in the soil is of particular importance. therefore, the purpose of the present study was to investigate the Effect of foliar application of micronutrients and salicylic acid to improve some quality traits and yield of canola (*Brassica napus* L.) under water deficit stress.

Materials and methods

the experiment was conducted as split factorial in a randomized complete block design with three replications at Lorestan University College of Agriculture, Iran during 2017-2018. Water deficit was considered as the main factor in levels irrigation at 80 (control) and 30% of field capacity, and in the subplots subtractive treatment of the two factors of foliar application of micronutrient elements (non-consumption and spraying at a concentration of 0.2%) and salicylic acid concentration of 0, 0.5, 1 and 1.5 mM). The time of water deficit stress coincided with the stage of the beginning of regrowth (BBCH32). foliar application of micronutrient fertilizer in rosette stage (BBCH29) and foliar application of salicylic acid in two stage of flowering beginning (BBCH60) and pod filling (BBCH72). the measured traits included Chlorophyll Total, Carotenoids, Photosynthesis rate, Transpiration rate, seed yield, oil percentage, and Protein percentage. the data was analyzed by statistical analysis system (SAS version: 9.1). the means were analyzed using the Duncan test at P=0.05.

[*] Corresponding author: Younes Mir; E-Mail: Younesmir80@yahoo.com

© 2024, The Author(s). Published by University of Birjand. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Results and discussion

The results of analysis of variance showed that the triple interaction of stress in micronutrient fertilizer and salicylic acid on all traits studied in this experiment were significant.The results of comparing the mean of the data showed that water deficit stress significantly reduced total chlorophyll (14%), carotenoids (21%), photosynthesis rate (19%), transpiration rate (53%), grain yield (27%), oil percentage (11%) and significantly increased protein content Seeds (22%). the combination (no stress + 1.5 mM salicylic acid spraying and concentration of 2 per thousand fertilizers Micronutrients) was obtained. produced the highest total chlorophyll (2.23 mg g^{-1} wet weight), transpiration rate (3.12 mmol H_2O_2 m^{-2} s^{-1}), seed yield (4955.7 kg ha^{-1}) and oil percentage (45.7). foliar application of micronutrient fertilizer and 1.5 mM of salicylic acid significantly increased total chlorophyll (34%), carotenoids (29%), photosynthesis rate (27%) and Seed yield (36%) compared to the control treatment (without application of micronutrient fertilizer and Salicylic acid).

Conclusion

A triple micronutrient fertilizer (iron+zinc+ manganese) with a concentration of 0.2% is recommended along with a concentration of 1.5 mM of salicylic acid to reduce the negative effects of water deficit stress and achieving acceptable seed yield.

Keywords: Carotenoids, Chlorophyll, Photosynthesis, Seed protein, Transpiration

تنش‌های محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses in Crop Sciences
جلد هفدهم، شماره اول، بهار ۱۴۰۳

https://dx.doi.org/10.22077/ESCS.2023.5357.2141

مقاله پژوهشی

محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی و اسید سالیسیلیک به‌منظور بهبود برخی صفات کیفی و عملکرد کلزا (*Brassica napus* L.) تحت تنش کم‌آبی

یونس میر[1*]، حامد خسروی[2]، ماشااله دانشور[3]، احمد اسماعیلی[4]

۱. دانش‌آموخته دکتری، گروه مهندسی ژنتیک و تولید گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد
۲. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی ژنتیک و تولید گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد
۳. استادیار، گروه مهندسی ژنتیک و تولید گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد
۴. استاد، گروه مهندسی ژنتیک و تولید گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد

مشخصات مقاله

واژه‌های کلیدی:
پروتئین دانه
تعرق
فتوسنتز
کارتنوئید
کلروفیل

تاریخ دریافت:
۱۴۰۱/۰۳/۱۲

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۱/۰۴/۱۳

تاریخ انتشار:
بهار ۱۴۰۳
۱۷(۱): ۳۱-۴۵

چکیده

به‌منظور بررسی اثر محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی و اسید سالیسیلیک به‌منظور بهبود برخی صفات کیفی و عملکرد کلزا تحت تنش کم‌آبی، آزمایشی به‌صورت اسپلیت‌پلات فاکتوریل در قالب طرح آماری بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال زراعی (۱۳۹۷-۱۳۹۶) در دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان اجرا شد. آبیاری در دو سطح (آبیاری در ۸۰ درصد FC و آبیاری در ۳۰ درصد FC) در کرت‌های اصلی و ترکیب عناصر ریزمغذی آهن، روی و منگنز در دو سطح (عدم مصرف و محلول‌پاشی با نسبت ۲ در هزار) و عامل اسید سالیسیلیک در چهار سطح (صفر، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ میلی‌مولار) در کرت‌های فرعی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد بیش‌ترین کلروفیل کل (۲/۲۳ میلی مول بر مترمربع بر ثانیه)، سرعت تعرق (۳/۱۲ میلی مول بر مترمربع بر ثانیه)، عملکرد دانه (۴۹۵۵/۷ کیلوگرم در هکتار) و درصد روغن (۴۵/۷) از ترکیب (عدم تنش کم‌آبی، محلول‌پاشی یک میلی‌مولار اسید سالیسیلیک و غلظت دو در هزار کود ریزمغذی حاصل شد. در شرایط تنش کم‌آبی کاربرد هم‌زمان کود ریزمغذی و اسید سالیسیلیک با غلظت یک و نیم میلی‌مولار موجب افزایش معنی‌دار کلروفیل کل (۳۴ درصد)، کارتنوئید (۲۹ درصد) سرعت فتوسنتز (۲۷ درصد) و عملکرد دانه (۳۶ درصد) نسبت به تیمار شاهد (بدون کاربرد کود ریزمغذی و اسید سالیسیلیک) شد. لذا استفاده از کود ریزمغذی (آهن+ روی+ منگنز) با غلظت دو در هزار به همراه غلظت یک و نیم میلی‌مولار اسید سالیسیلیک جهت کاهش اثرات سوء تنش کم‌آبی و حصول عملکرد مناسب توصیه می‌شود.

مقدمه

کلزا با نام علمی (*Brassica napus* L.) یکی از گیاهان دانه روغنی مهم در دنیا به شمار رفته و پس از سویا، دومین گیاه روغنی یک‌ساله جهان است که به خاطر روغن خوراکی آن کشت‌شده و به‌راحتی در تناوب با غلات قرار می‌گیرد (FAO, 2018). کلزا به سبب دارا بودن میزان ۴۵ –۴۰ درصد روغن خالص در دانه، کیفیت خوب روغن به دلیل نسبت بالای اسیدهای چرب غیراشباع به اسیدهای چرب اشباع و فقدان کلسترول، کشت و کار آسان، عملکرد مطلوب در مقایسه با سایر گیاهان زراعی، صفات زراعی ویژه و ثبات نسبی عملکرد، قابلیت جایگزینی در تناوب، کشت به‌صورت پائیزه و بهاره، راندمان مصرف آب بالا، تحمل در برابر شوری خاک، توقع اندک نسبت به مواد غذایی موجود در خاک، مقاومت به سرما و سازگاری با شرایط اقلیمی مناطق مختلف کشور، توانایی بالقوه بالایی برای تأمین قسمت عمده روغن موردنیاز کشور

* نگارنده پاسخگو: یونس میر. پست الکترونیک: Younesmir80@yahoo.com

و کمک به اقتصاد خانوارهای کشور را داراست (Vahedi, 2014). کل سطح زیر کشت کلزا کشور در سال زراعی ۹۶-۹۷ معادل ۱۹۱۲۵۱ هکتار بود که از این سطح ۱۵۵۶۲۲ هکتار آن به‌صورت آبی و ۳۵۶۲۹ هکتار به‌صورت دیم کشت گردید که میانگین عملکرد کشت آبی معادل ۱۷۷۷ کیلوگرم در هکتار و میانگین عملکرد دیم آن ۱۴۹۵ کیلوگرم در هکتار بود. سطح زیر کشت استان لرستان حدود ۱۷۴۰ هکتار کشت آبی و ۲۸ هکتار کشت دیم بود که میانگین عملکرد آبی آن ۱۸۷۸ کیلوگرم در هکتار و میانگین عملکرد دیم حدود ۷۰۰ کیلوگرم در هکتار گزارش شد (Ahmadi et al., 2019).

خشکی به‌طورجدی مهم‌ترین عامل محدودکننده رشد و تولید کلزا در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران است (Majidi et al., 2015). تنش خشکی موجب کاهش درصد روغن دانه، عملکرد روغن کلزا و کاهش درصد اسیدهای چرب اشباع روغن دانه در شش رقم کلزا شد (Moghadam et al., 2018). گزارش‌ها نشان داده که تنش خشکی و کم‌آبی به دلیل تولید انواع اکسیژن‌های فعال در تیلاکوئید سبب کاهش غلظت کلروفیل‌ها و کارتنوئید در گیاهان می‌شود (Farooq et al., 2009). تنش کم‌آبی از طریق کاهش حلالیت و کاهش جذب عناصر غذایی موجب برهم زدن تعادل تغذیه‌ای در گیاه می‌شود (Heidary et al., 2016). با تکمیل مصرف عناصر غذایی کم‌مصرف از طریق محلول‌پاشی، می‌توان وضعیت رشد گیاه را در شرایط تنش بهبود بخشید (Rezaeichiane et al, 2017). کاربرد عناصر ریزمغذی باعث افزایش عملکرد دانه و عملکرد روغن در کلزا شد (Khodabin et al., 2019). تنش کم‌آبی باعث کاهش رشد و عملکرد دانه کلزا شد ولی استفاده از کود مرکب آهن، روی و منگنز توانسته تا ۳۵ درصد کاهش عملکرد را جبران کند (Payendeh et al., 2020). سالیسیلیک اسید یک تنظیم‌کننده است که در فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه نقش مهمی را ایفا می‌کند. القای گل‌دهی، رشد و نمو، سنتز اتیلن، تأثیر در مکانیسم باز و بسته شدن روزنه‌ها و تنفس از نقش‌های مهم سالیسیلیک اسید است (Akbari and Maleki, 2018). کاربرد سالیسیلیک اسید سبب افزایش تحمل گیاه نسبت به تنش خشکی شده و اثر کمبود آب را تعدیل و همچنین برخی از پارامترهای رشدی را افزایش داده است (Sahraei et al., 2018). محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک اسید موجب افزایش محتوای کلروفیل کلزا در تیمارهای رطوبتی گردید (Kalantar et al., 2017).

با توجه به اهمیت گیاه کلزا در تأمین احتیاجات غذایی به‌ویژه روغن و نظر به اینکه تنش کم‌آبی مهم‌ترین عامل محدودکننده رشد و تولید کلزا در ایران به شمار می‌رود. نیاز به تحقیقات درزمینه کاهش اثرات منفی تنش کم‌آبی بسیار ضروری به نظر می‌رسد. گزارش‌های متعددی در خصوص اثر مثبت عناصر ریزمغذی و اسید سالیسیلیک در گیاهان مختلف وجود دارد اما اطلاعات جامعی در خصوص کاربرد این ترکیبات بر گیاه کلزا در این منطقه موجود نیست، لذا هدف از پژوهش حاضر بررسی اثر محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی و اسید سالیسیلیک به‌منظور بهبود برخی صفات کیفی و عملکرد کلزا تحت تنش کم‌آبی بود.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال زراعی (۱۳۹۷-۱۳۹۶) در مزرعه کشاورزی دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان، واقع در شهرستان خرم‌آباد به‌صورت آزمایش اسپلیت‌پلات فاکتوریل با طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار اجرا شد و آمار هواشناسی محل انجام آزمایش در جدول ۱ ارائه شده است. به‌منظور اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، به‌طور تصادفی در چندین نقطه مزرعه از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک مزرعه، نمونه مرکب تهیه و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن تعیین شد (جدول ۲). بر مبنای نتایج آزمون خاک (جدول ۲) و عملکرد دانه مورد انتظار کلزا از طریق کاربرد جداول توصیه کودی موسسه آب‌وخاک کشور (جدول ۳) کود شیمیایی فسفره برحسب سوپر فسفات تریپل ۱۶۰ کیلوگرم در هکتار تعیین و هنگام کاشت (BBCH00) به کار برده شد. مقدار ۳۱۰ کیلوگرم کود نیتروژن از منبع اوره تعیین (جدول ۳) و این کود به‌صورت تقسیط و در سه نوبت: یک‌سوم این کود همزمان با کاشت (به‌صورت کود پایه همراه با کود فسفره) و باقیمانده آن در دو مرحله پایان روزت (BBCH30) و مرحله آغاز گل‌دهی (BBCH60) به‌صورت سرک مصرف شد (Khademi et al, 2001). همچنین با توجه به نتایج آزمون خاک (جدول ۲) و با در نظر گرفتن اینکه غلظت سه عنصر آهن، روی و منگنز در خاک محل آزمایش پایین‌تر از حد بحرانی برای کشت کلزا بود (جدول ۳)، لذا کمبود این عناصر باید از طریق مصرف کود جبران می‌گردید. کود ریزمغذی مورداستفاده در این تحقیق با نام فرتی میکس سه‌گانه دارای عناصر ریزمغذی آهن، روی و منگنز است که با EDTA و EDDHSA کلات شده و جهت

اصلاح و تنظیم کمبود این عناصر در گیاهان بسیار مؤثر است. این کود به‌صورت مایع بوده و توسط شرکت اورانتیکا اسپانیا فرموله و به بازار عرضه می‌شود (جدول ۴). کل آزمایش تعداد شش کرت اصلی و ۴۸ کرت فرعی داشت، ابعاد هر کرت فرعی ۱۰ مترمربع به‌صورت پنج در دو متر و شامل چهار ردیف کشت بود. فاصله بوته‌ها روی ردیف کشت پنج سانتی‌متر و فاصله بین ردیف‌های کشت و هم‌چنین فاصله بین کرت‌های مجاور ۵۰ سانتی‌متر، فاصله بین کرت‌های اصلی و هم‌چنین فاصله بین بلوک‌ها پنج متر بود. عملیات کاشت با تراکم ۸۰ بوته در مترمربع، پس از آماده‌سازی بستر بذر و اضافه کردن کودهای پایه (نیتروژن، فسفر و پتاسیم) بر اساس نتایج آزمون خاک، در پاییز و به‌صورت دستی انجام گرفت. زمان کاشت ۱۲ مهرماه بود. برای تراکم مناسب در هر کرت، در مرحله چهار تا شش برگی اقدام به تنک گیاهان با تراکم ۴۰ بوته شد. رقم مورداستفاده در این آزمایش رقم نپتون بود و این رقم در کشورهای فرانسه و مجارستان ثبت شده است و دارای ویژگی‌های پتانسیل عملکرد بالا، زمستانه و دو صفر (میزان اسید اروسیک و گلوکوزینولات کم)، دارای قدرت شاخه‌دهی بالا، ارتفاع متوسط، مقاوم به ریزش و ورس، مقاوم به سرما، متحمل به بیماری‌های قارچی فوما و اسکلروتینا، مقاوم به گل جالیز و تراکم مناسب ۴۰ بوته در مترمربع است (Ministry of Agriculture, 2015).

جدول ۱. آمار هواشناسی شهرستان خرم‌آباد در طی دوره آزمایش

Table 1. Weather statistics of Khorramabad city during the experimental period.

Month	ماه	مجموع ساعات آفتابی Total hours of sunshine	متوسط دما Mean of air temperature	بارندگی Precipitation
		h	°C	mm
October	مهر	302.4	20.4	0
November	آبان	219.9	15.7	2.8
December	آذر	194.1	7.5	36.6
January	دی	205.2	7.6	50.1
February	بهمن	154.5	8.3	68.7
March	اسفند	207.3	11.7	62.7
April	فروردین	222.7	15.2	103.7
May	اردیبهشت	194	17.2	151
June	خرداد	318.6	24.6	12

جدول ۲. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش در عمق صفر تا ۳۰ سانتیمتری

Table 2. Physical and chemical properties of soil experimental site(0-30cm)

درصد کربن آلی Organic carbon	فسفر P	پتاسیم K	آهن Fe	منگنز Mn	روی Zn	مس Cu	اسیدیته خاک pH	هدایت الکتریکی EC
%	ppm							$ds.m^{-1}$
0.78	7.4	262	4.8	3.8	0.48	0.81	7.6	0.64

بافت خاک لؤمی رسی (۳۵ درصد رس، ۳۹ درصد شن و ۲۶ درصد سیلت)، وزن مخصوص ظاهری خاک ۱/۴۷ و ظرفیت زراعی ۲۳/۷۰ درصد.

Soil texture clay loam(Clay 35%, Silt 36%, Sand39%), Bulk density 1.57 and Fc 23.70

جدول ۳. حد بحرانی عناصر غذایی در خاک‌های زیر کشت کلزا (Khademi et al, 2001)

Table 3. critical limit of nutrients in soils under canola cultivation (Khademi et al, 2001).

عناصر Elements	مس Cu	روی Zn	منگنز Mn	آهن Fe	پتاسیم K	فسفر P
	$mg.kg^{-1}$					
غلظت عنصر Element complexity	0.8	1	5	5	200	15

جدول ۴. میزان عناصر موجود در کود ریزمغذی فرتی میکس سه‌گانه

Table 4. Elements of micronutrient fertilizers Ferti mix Trio

عناصر Elements	منگنز Mn	روی Zn	آهن Fe
	---------- % (درصد وزنی) ----------		
غلظت عنصر Element complexity	2	2	5

آبیاری در دو سطح (آبیاری در ۸۰ درصد FC و آبیاری در ۳۰ درصد FC) در کرت‌های اصلی و ترکیب عناصر ریزمغذی آهن، روی و منگنز در دو سطح (عدم مصرف و محلول‌پاشی با نسبت ۲ در هزار) و عامل اسید سالیسیلیک در چهار سطح (صفر، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ میلی‌مولار) در کرت‌های فرعی مورد مقایسه قرار گرفت. تیمارهای آزمایش بر اساس مراحل توسعه فنولوژیک کلزا و با استفاده از سیستم جدید کدبندی BBCH[1] اعمال شد. محلول‌پاشی کود ریزمغذی در مرحله روزت (BBCH29) و محلول‌پاشی هورمون اسید سالیسیلیک در دو مرحله آغاز گل‌دهی (BBCH60) و پر شدن خورجین (BBCH72) انجام گرفت. محلول‌پاشی با استفاده از پمپ دستی و در زمان صبح یا بعدازظهر و در زمانی که وزش باد وجود نداشت انجام گرفت و جهت اعمال دقیق محلول‌پاشی و جلوگیری از اسپری محلول هر کرت به کرت‌های مجاور هنگام محلول‌پاشی از پوشش پلاستیکی در دو طرف هر کرت استفاده شد. اعمال تنش هم‌زمان با مرحله خارج شدن گیاه از روزت و آغاز رشد مجدد (BBCH32)، با اندازه‌گیری رطوبت خاک قبل از آبیاری به روشی که در ذیل آمده است، انجام گرفت. جهت تعیین زمان آبیاری در فاصله بین دو آبیاری و باگذشت ۴۸ ساعت از زمان آبیاری، روزانه از هر کرت اصلی، یک کرت فرعی به‌طور تصادفی انتخاب و توسط مته نمونه‌هایی از خاک مزرعه در منطقه مؤثر ریشه (با زدن پروفیل خاک) که تابعی از مرحله رشد گیاه است تهیه و به‌منظور تعیین رطوبت خاک به آزمایشگاه منتقل گردید. پس از رسیدن درصد رطوبت وزنی خاک به میزان تعیین‌شده جهت انجام آبیاری کامل از رابطه زیر حجم آبیاری (VW) برحسب مترمکعب محاسبه شد (Alizadeh, 2002).

$$VW=\frac{(FC-Q)\times BD\times D\times A}{Ea} \quad [۱]$$

1- Biologische Bundesanstalt Bundessortenamt and Chemical industry

در این رابطه FC: درصد وزنی رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای، Q: درصد وزنی رطوبت خاک هنگام نمونه‌برداری برای آبیاری، BD: وزن مخصوص ظاهری خاک برحسب گرم بر سانتی‌متر مکعب، D: عمق مؤثر توسعه ریشه گیاه برحسب متر، A: مساحت کرت برحسب مترمربع، Ea: کارایی آبیاری در مزرعه است. بدین ترتیب حجم آب موردنیاز در هر مرتبه آبیاری در هر مرحله محاسبه و بر اساس کارایی توزیع آب ۹۰ درصد با استفاده از کنتور به‌صورت یکنواخت توزیع شد. در مرحله گلدهی کامل (BBCH67) از روش لیختن‌تالر (Lichtenthaler, 1987) از پهنک آخرین برگ توسعه‌یافته و سالم بالای بوته برای اندازه‌گیری مقدار کلروفیل کل و کاروتنوئید استفاده شد. برای اندازه‌گیری سرعت فتوسنتز و تنفس در پایان مرحله گل‌دهی از هر کرت تعداد پنج بوته انتخاب و تبادلات گازی سه برگ بالایی آن‌ها با استفاده از دستگاه تحلیل‌گر گاز مادون‌قرمز مدل LCA4 (شرکت ADC Bioscientific، انگلستان) و در ساعت ۱۱-۱۲ پیش از ظهر و شدت نور ۱۲۰۰-۱۴۰۰ میکرو مول فوتون بر مترمربع بر ثانیه و در دمای ۲۴±۲ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد (Shah, 2011). در مرحله رسیدگی کامل با در نظر گرفتن اثر حاشیه‌ای برداشت از مساحت ۳/۶۰ مترمربع انجام گرفت و جهت تعیین عملکرد دانه نمونه‌ها خرمن‌کوبی و مورد عمل بوجاری قرارگرفته و سپس توزین شدند. میزان روغن و پروتئین دانه کلزا به‌وسیله دستگاه اتوآنالیزور NIR (مدل GA7250 ساخت شرکت پرکنز سوئد) تعیین شد. در پایان کلیه داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS Ver.9.1 تجزیه گردید. مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد صورت گرفت و برای رسم جداول از نرم‌افزار Excel استفاده شد.

نتایج و بحث

کلروفیل کل برگ

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثرهای ساده کود و اسید سالیسیلیک در سطح احتمال یک درصد و اثر ساده تنش، برهم‌کنش دوگانه تنش در اسید سالیسیلیک و برهم‌کنش سه‌گانه تنش در کود در اسید سالیسیلیک در سطح احتمال پنج درصد بر کلروفیل برگ معنی‌دار شد (جدول ۵).

نتایج مقایسه میانگین برهم‌کنش سه‌گانه تنش در کود ریزمغذی در سالیسیلیک اسید نشان داد که تنش کم‌آبی باعث کاهش کلروفیل مجموع شده است. ترکیب تیماری A1B2C3 (عدم تنش+ محلول‌پاشی کود ریزمغذی+ غلظت‌های یک میلی‌مولار اسید سالیسیلیک) با میانگین ۲/۲۳ میلی‌گرم بر گرم وزن تر بیش‌ترین و ترکیب A2B1C1 (تنش کم‌آبی+ عدم محلول‌پاشی کود ریزمغذی+ عدم محلول پاشی اسید سالیسیلیک) با میانگین ۱/۴۱ پایین‌ترین میزان کلروفیل کل را ایجاد کردند (جدول ۶). مطالعات نشان داده که تنش رطوبتی در مراحل رشد رویشی، گل‌دهی و خورجین‌دهی سبب کاهش میزان کلروفیل a و b و کارتنوئیدها می‌شود (Din et al., 2011; Fani et al., 2019) که این نتایج با نتایج حاصل از این پژوهش مطابقت داشت. کاهش رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی در شرایط تنش خشکی ممکن است به دلیل ناپایداری کمپلکس‌های پروتئینی و تخریب کلروفیل به‌وسیله افزایش فعالیت آنزیم کلروفیلاز باشد (El-Tayeb, 2005) محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک موجب افزایش ۱۱/۷۷ درصدی میزان کلروفیل کل در گیاه کلزا گردید (Mohammadi et al., 2018). اثر افزایشی اسید سالیسیلیک بر رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی می‌تواند در ارتباط با متابولیسم نیترات داخلی بافت‌ها و بیوسنتز کلروفیل باشد (Shi et al., 2006) و همچنین تأثیر آن بر تحریک فعالیت آنزیم رابیسکو و میزان فتوسنتز باشد (Idrees et al., 2011). مصرف عناصر ریزمغذی باعث افزایش معنی‌دار کلروفیل کل در گیاه کلزا نسبت به شرایط عدم مصرف آن شد (Khodabin et al., 2019). در پژوهش حاضر با کاربرد کود ریزمغذی و سالیسیلیک اسید غلظت کلروفیل کل افزایش یافت. مطابق نتایج آنالیز خاک محل آزمایش غلظت عناصر ریزمغذی آهن، روی و منگنز در هر دو سال پایین‌تر از حد بحرانی غلظت این عناصر برای رشد کلزا بود (جدول ۲ و ۳)، لذا کاربرد کود ریزمغذی کاملاً توجیه‌پذیر بود و عکس‌العمل مثبت صفت کلروفیل کل نسبت به کاربرد این عناصر را می‌توان به کمبود این عناصر در خاک محل آزمایش مرتبط دانست.

جدول ۵. تجزیه واریانس صفات اندازه‌گیری شده در کلزا **Table 5. analysis of variance for measured traits of Rapeseed**

منابع تغییرات S.O.V	df	کلروفیل کل Chlorophyl Total	کارتنوئید Carotenoid	سرعت فتوسنتز Photosynthesis rate	سرعت تعرق Transpiration rate	عملکرد دانه seed yield	درصد روغن oil percentage	درصد پروتئین Protein percentage
تکرار Replication	2	0.003	0.0004	0.26	0.058	7162.90	0.66	0.40
تنش Water stress (A)	1	0.576*	0.0414**	28.20**	11.594**	7892108**	185.54**	141.59**
خطای کرت اصلی Error (a)	2	0.008	0.0003	0.19	0.029	52187	1.48	1.09
کود Micronutrient (B)	1	0.880**	0.0180**	4.28**	1.156**	4541387**	26.30**	0.32ns
اسید سالیسیلیک Salicylic acid(C)	3	0.283**	0.0096**	3.92**	0.606**	1334950**	12.01**	0.65ns
تنش× کود A*B	1	0.018ns	0.0023**	0.36ns	0.055ns	92942 ns	0.62ns	0.08ns
تنش×اسید سالیسیلیک A*C	3	0.033*	0.0007*	0.02ns	0.068*	107084*	4.07**	7.81ns
کود× اسید سالیسیلیک B*C	3	0.009ns	0.0005ns	0.85**	0.092**	97030*	2.86**	2.37**
تنش×کود×اسید سالیسیلیک A*B*C	3	0.024*	0.0008*	0.41*	0.116**	103119*	1.80**	0.20**
خطای کل Error (T)	28	0.008	0.0002	0.11	0.018	28815	0.50	0.48
ضریب تغییرات CV%		*4.72*	*3.79*	*4.32*	*6.58*	*4.58*	*1.72*	*2.84*

*، ** و n.s به ترتب معنی‌دار و غیر معنی‌دار در سطح احتمال یک و پنج درصد

ns, * and **: Not-significant and significant at 5% and 1% probability levels, respectively.

جدول ۶. مقایسه برهم‌کنش سه‌جانبه تنش در کود ریزمغذی در اسید سالیسیلیک بر صفات اندازه‌گیری شده در کلزا

Table 6. Means comparison of three way intraction on the measured traits of Rapeseed

تیمار Treatment	کلروفیل کل Chlorophyll Total	کارتنوئید Carotenoids	سرعت فتوسنتز Photosynthesis rate	سرعت تعرق Transpiration rate	عملکرد دانه seed yield	درصد روغن oil percentage	درصد پروتئین Protein percentage
	--- $mg.g^{-1}$ wet weight ---		$mmol\ CO_2\ m^{-2}s^{-1}$	$mmol\ H_2O\ m^{-2}\ s^{-1}$	$kg.ha^{-1}$	----------% ----------	
A1B1C1	1.63^{fgh}	0.39^{fgh}	7.56^{def}	2.16^{f}	3520^{fg}	41.1^{e}	21.1^{h}
A1B1C2	1.76^{def}	0.41^{efg}	8.06^{bcd}	2.54^{cd}	3824^{def}	43.0^{bc}	22.8^{fg}
A1B1C3	1.94^{c}	0.45^{ab}	8.44^{bc}	2.25^{ef}	3917^{de}	42.8^{bcd}	23.3^{efg}
A1B1C4	1.86^{cd}	0.42^{cde}	8.12^{bcd}	2.45^{de}	4121^{cd}	41.5^{de}	23.6^{ef}
A1B2C1	1.97^{bc}	0.42^{def}	8.04^{bcd}	2.21^{ef}	3841^{de}	42.7^{bcd}	22.3^{fgh}
A1B2C2	2.13^{a}	0.43^{bcde}	8.35^{bc}	2.72^{bc}	4211^{bc}	43.5^{b}	22.7^{fg}
A1B2C3	2.23^{a}	0.45^{abc}	8.64^{b}	3.12^{a}	4955^{a}	45.7^{a}	23.3^{efg}
A1B2C4	2.11^{ab}	0.48^{a}	10.23^{a}	2.86^{b}	4482^{b}	43.4^{b}	22.1^{gh}
A2B1C1	1.41^{i}	0.31^{l}	6.07^{i}	1.14^{j}	2580^{k}	36.4^{h}	27.2^{ab}
A2B1C2	1.56^{h}	0.34^{k}	6.56^{hi}	1.35^{ij}	2806^{jk}	39.2^{fg}	26.2^{bc}
A2B1C3	1.82^{cde}	0.35^{jk}	6.91^{gh}	1.74^{g}	3050^{ij}	39.3^{fg}	25.5^{cd}
A2B1C4	1.68^{efgh}	0.38^{ghi}	7.21^{fg}	1.51^{ghi}	3350^{gh}	38.7^{fg}	25.9^{c}
A2B2C1	1.59^{gh}	0.36^{jkl}	6.38^{hi}	1.44^{hi}	3126^{hi}	38.1^{g}	27.5^{a}
A2B2C2	1.73^{defg}	0.37^{hij}	6.88^{gh}	1.65^{gh}	3662^{ef}	39.1^{fg}	26.3^{abc}
A2B2C3	1.96^{bc}	0.43^{bcde}	7.30^{efg}	2.00^{f}	3729^{ef}	39.7^{f}	25.4^{cd}
A2B2C4	2.12^{a}	0.44^{bcd}	7.89^{cde}	1.62^{gh}	4081^{cd}	41.8^{cde}	24.5^{de}

داده‌های دارای حروف مشترک در هر ستون فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد با آزمون دانکن است.A1 و A2 به ترتیب آبیاری در ۸۰ و ۳۰ درصد ظرفیت زراعی مزرعه، B1 و B2 به ترتیب عدم مصرف و محلول‌پاشی کود ریزمغذی با نسبت دو در هزار و C1، C2، C3 و C4 به ترتیب محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک با غلظت‌های (صفر، نیم، یک، یک و نیم) میلی‌مولار است.

Means in each column and for each treatment, followed by similar letter(s) are not significantly different at 5 Percent of probability level, using Duncan´s Multiple Range Test. A1 and A2, respectively, irrigation at 80 and 30% of field capacity, B1 and B2, respectively, (non-consumption and spraying at a concentration of 0.2%) and C1, C2, C3, C4, respectively, foliar application of salicylic acid with concentrations of 0, 0.5, 1 and 1.5 mM.

آهن در ساختمان سیتوکروم، به‌عنوان ناقل الکترون در سیستم‌های فتوسنتزی، تنفس و عملیات اکسیداسیون و احیا و ساخت کلروفیل دخالت دارد، به نظر می‌رسد کاربرد عناصر ریزمغذی از طریق جبران کمبود عناصر ریزمغذی به‌ویژه آهن باعث افزایش کلروفیل کل شد. سالیسیلیک اسید نیز از طریق افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت، گیاه را از صدمات به‌دست‌آمده از واکنش‌های اکسیداتیو حفظ کرده و موجب کاهش خسارت تنش اکسیداتیو شده است.

کارتنوئید

نتایج تجزیه واریانس ساده داده‌ها نشان داد اثر ساده تنش، کود، اسید سالیسیلیک و برهم‌کنش دوگانه کود در اسید سالیسیلیک در سطح احتمال یک درصد، برهم‌کنش دوگانه تنش در اسید سالیسیلیک و برهم‌کنش سه‌گانه تنش در کود در اسید سالیسیلیک در سطح احتمال پنج درصد بر صفت کارتنوئید برگ معنی‌دار گردید (جدول ۵). نتایج مقایسه میانگین برهم‌کنش سه‌گانه تنش در کود ریزمغذی در سالیسیلیک اسید نشان داد که تنش کم‌آبی همچون صفت کلروفیل باعث کاهش میزان کارتنوئید گردیده است. ترکیب تیماری A1B2C4 (عدم تنش+ محلول‌پاشی کود ریزمغذی+ غلظت‌های یک و نیم میلی‌مولار اسید سالیسیلیک) با میانگین ۰/۴۸ میلی‌گرم بر گرم وزن تر بیش‌ترین و ترکیب A2B1C1 (تنش کم‌آبی+ عدم محلول‌پاشی کود ریزمغذی+ عدم محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک) با میانگین ۰/۳۱ میلی‌گرم بر گرم وزن تر کم‌ترین میزان کارتنوئید را به خود اختصاص داد (جدول ۶). در شرایط تنش کم‌آبی کاربرد هم‌زمان کود ریزمغذی و اسید سالیسیلیک موجب افزایش ۳۰ درصدی میزان کارتنوئید شد و بیش‌ترین میزان کارتنوئید از ترکیب تیماری A2B2C4 با میانگین ۰/۴۴ میلی‌گرم بر گرم وزن تر حاصل شد، هرچند که بین این ترکیب و ترکیب A2B2C3 تفاوت معنی‌داری وجود نداشت و هر دو در یک کلاس آماری قرار گرفتند. با توجه به اینکه با افزایش کاربرد اسید

سالیسیلیک از غلظت‌های یک میلی‌مولار به غلظت یک ونیم میلی‌مولار اسید سالیسیلیک تفاوت معنی‌داری حاصل نشد، لذا غلظت یک میلی‌مولار اسید سالیسیلیک بهینه است. گزارش‌ها نشان داده که تنش خشکی به دلیل تولید انواع اکسیژن‌های فعال در تیلاکوئید سبب کاهش غلظت کلروفیل‌ها و کارتنوئید در گیاهان می‌شود (Farooq et al., 2009; Jaleel et al., 2009). محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید در شرایط تنش کم‌آبی باعث افزایش میزان کاروتنوئیدها در شرایط تنش کم‌آبی می‌شود (Kalantar et al., 2017; Idrees et al., 2011). آهن نیز عنصری ضروری برای رشدونمو گیاهان است و در سنتز کلروفیل، تیلاکوئیدها و نمو کلروپلاست‌ها دخالت دارد (Curie and Briat, 2003). کمبود مقدار آهن در گیاه می‌تواند علاوه بر کاهش سنتز کلروپلاست، با کاهش محسوس کاروتنوئید همراه شود؛ چرا که این رنگ‌دانه‌ها در غشای کلروپلاست جای دارند؛ بنابراین وجود آهن کافی برای سنتز کلروپلاست‌ها ضروری به نظر می‌رسد. در آزمایش حاضر نیز کاربرد هم‌زمان کود ریزمغذی و سالیسیلیک اسید، توانست میزان کارتنوئید را در هر دو شرایط عدم تنش و تنش افزایش داد، به‌طورکلی از این نتایج به‌دست‌آمده چنین استنباط می‌شود در این مناطق مشکل کمبود یا مشکل جذب عناصر ریزمغذی به‌ویژه آهن وجود داشته و محلول‌پاشی کود ریزمغذی و سالیسیلیک اسید توانسته این مشکل را تا حدودی برطرف کندو باعث افزایش سنتز کلروپلاست و نهایتاً افزایش میزان کارتنوئید شود.

سرعت فتوسنتز

نتایج تجزیه واریانس ساده داده‌ها نشان داد اثرهای ساده تنش، کود، اسید سالیسیلیک در سطح احتمال پنج درصد و برهم‌کنش سه‌گانه تنش در کود در اسید سالیسیلیک در سطح احتمال یک درصد بر سرعت فتوسنتز معنی‌دار شد (جدول ۵). نتایج مقایسه میانگین برهم‌کنش سه‌گانه تنش در کود ریزمغذی در سالیسیلیک اسید نشان داد که با محلول‌پاشی کود ریزمغذی و سالیسیلیک اسید سرعت فتوسنتز افزایش یافت، ترکیب تیماری A1B2C4 با میانگین ۱۰/۲۳ بیش‌ترین و ترکیب تیماری A2B1C1 با میانگین ۶/۰۷ میلی‌مول بر مترمربع بر ثانیه کم‌ترین سرعت فتوسنتز را داشت (جدول ۶). در شرایط تنش کم‌آبی کاربرد هم‌زمان کود ریزمغذی و اسید سالیسیلیک موجب افزایش ۱۷ درصدی سرعت فتوسنتز شد و بیش‌ترین سرعت فتوسنتز به ترتیب از ترکیب تیماری A2B2C4 و A2B2C3 با میانگین‌های ۷/۸۹ و ۷/۳۰ میلی‌مول بر مترمربع بر ثانیه حاصل شد. هرچند که بین این دو ترکیب تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد وجود نداشت و هر دو در یک کلاس آماری قرار گرفتند. با توجه به اینکه با افزایش کاربرد اسید سالیسیلیک از غلظت‌های یک میلی‌مولار به غلظت یک ونیم میلی‌مولار اسید سالیسیلیک تفاوت معنی‌داری حاصل نشد، لذا غلظت یک میلی‌مولار اسید سالیسیلیک بهینه است. تنش خشکی در مرحله گل‌دهی باعث کاهش معنی‌دار سرعت فتوسنتز کلزا شد (Monajam et al., 2011). آهن، عنصر ضروری برای رشد و نمو گیاهان است. عدم دسترسی به آهن موجب زرد شدن برگ‌های جوان می‌شود و باعث کاهش چشم‌گیر فعالیت فتوسنتز و درنتیجه تولید بیوماس می‌شود (Briat et al., 2007). مصرف عنصر روی میزان کلروفیل و فعالیت فتوسنتزی گیاه را افزایش می‌دهد و سبب توسعه پوشش گیاهی و افزایش عملکرد گیاه می‌شود (Pirzad et al., 2011). منگنز به‌طور مستقیم از طریق افزایش ترکیبات و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و به‌طور غیرمستقیم از طریق افزایش سرعت فتوسنتز و متابولیسم نیتروژن نقش مهمی در کاهش تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن ناشی از تنش‌های محیطی در گیاهان دارد (Waraich et al., 2012). در پژوهش حاضر کاربرد عناصر ریزمغذی میزان فتوسنتز در هر دو شرایط تنش و عدم تنش افزایش معنی‌داری داشت. گزارش‌هایی وجود دارد که بیان می‌دارد کاربرد سالیسیلیک اسید بر گیاهان موجب افزایش فتوسنتز و صفات وابسته تحت شرایط نرمال و تنش شده است. اسید سالیسیلیک از طریق جلوگیری از تخریب کلروپلاست و افزایش ظرفیت انتقال الکترون توسط فتوسیستم II می‌تواند باعث افزایش فتوسنتز شود (Shakirova et al., 2003).

سرعت تعرق

نتایج تجزیه واریانس ساده داده‌ها نشان داد اثرهای ساده تنش، کود، اسید سالیسیلیک، اثر دوگانه کود در اسید سالیسیلیک و برهم‌کنش سه‌گانه تنش در کود در اسید سالیسیلیک در سطح احتمال یک درصد و برهم‌کنش دوگانه تنش در اسید سالیسیلیک در سطح احتمال پنج درصد بر سرعت تعرق معنی‌دار شد (جدول ۵). هم‌چنین مقایسه میانگین برهم‌کنش سه‌گانه تنش در کود ریزمغذی در سالیسیلیک اسید نشان داد که تنش کم‌آبی موجب بسته

شدن روزنه‌ها و کاهش درصدی سرعت تعرق در شرایط تنش شده است. بیش‌ترین میزان سرعت تعرق از ترکیب تیماری A1B2C3 با میانگین ۳/۱۲ میلی مول بر مترمربع بر ثانیه حاصل شد و پایین‌ترین سرعت تعرق هم با میانگین ۱/۱۴ به ترکیب تیماری A2B1C1 تعلق داشت (جدول ۶). عنصر ریزمغذی روی موجب حفظ پتاسیم موردنیاز سلول‌های نگهبان روزنه و درنتیجه باز شدن روزنه‌ها می‌شود (Fateh et al., 2012). اسید سالیسیلیک باعث افزایش راندمان مصرف آب و میزان تعرق در برگ‌های سویا شد (Khan et al., 2003). در گیاهان زراعی تعرق بارزترین شکل تلفات آب است. گیاه در شرایط تنش کم‌آبی روزنه‌ها را بسته تا از هدر رفت آب جلوگیری کند، درنتیجه طبیعی به نظر می‌رسد که میزان تعرق در شرایط تنش کم‌آبی، پایین‌تر از شرایط مطلوب باشد. به‌عبارت‌دیگر کاهش میزان تعرق در تیمار تحت تنش احتمالاً به دلیل بسته شدن روزنه‌ها و کاهش هدایت روزنه‌ای است. استفاده از کود ریزمغذی و سالیسیلیک اسید توانست ضمن برطرف کردن شرایط منفی تنش تا حدودی سرعت تعرق را در شرایط عدم تنش ۳۵ و در شرایط تنش کم‌آبی حدود ۴۱ درصد افزایش دهد. تنش خشکی در مرحله گل‌دهی باعث کاهش معنی‌دار سرعت تعرق می‌شود (Monajam et al., 2011) که این نتایج با نتایج حاصل از این پژوهش مطابقت داشت. گزارش‌شده که برای عملکرد مطلوب، گیاه باید روزنه‌ها را در طی تنش باز نگه دارد، به‌گونه‌ای که آب و مواد غذایی را بهتر از خاک دریافت کند (Refay, 2011). در پژوهش حاضر تنش کم‌آبی موجب کاهش سرعت تعرق و فتوسنتز گردید، اما استفاده از کود ریزمغذی و سالیسیلیک اسید توانست ضمن برطرف کردن شرایط منفی تنش تا حدودی سرعت تعرق را افزایش دهد که به دنبال آن افزایش در سرعت ورود دی‌اکسید کربن، فتوسنتز و نهایتاً افزایش عملکرد دانه را به دنبال داشت.

عملکرد دانه

مطابق نتایج تجزیه واریانس ساده داده‌ها اثرهای تنش، کود و اسید سالیسیلیک در سطح احتمال یک درصد و برهم‌کنش دوگانه تنش در اسید سالیسیلیک و کود در اسید سالیسیلیک و برهم‌کنش سه‌گانه تنش در کود در اسید سالیسیلیک در سطح احتمال پنج درصد بر عملکرد دانه معنی‌دار شد (جدول ۵). نتایج مقایسه میانگین برهم‌کنش سه‌گانه نشان داد بیش‌ترین عملکرد دانه با میانگین ۴۹۵۵/۷ کیلوگرم در هکتار از ترکیب تیماری A1B2C3 حاصل شد. تنش کم‌آبی موجب کاهش معنی‌دار (۲۷ درصدی) عملکرد دانه شد و کم‌ترین عملکرد دانه از ترکیب A2B1C1 با میانگین ۲۵۸۰ کیلوگرم در هکتار حاصل شد. کاربرد کود ریزمغذی و اسید سالیسیلیک موجب افزایش عملکرد در هر دو شرایط عدم تنش و تنش شد که تأثیر این ترکیبات در شرایط تنش مشهودتر بود. در شرایط تنش کم‌آبی مصرف کود ریزمغذی، غلظت یک و نیم میلی مولار اسید سالیسیلیک و کاربرد هم‌زمان کود ریزمغذی و اسید سالیسیلیک به ترتیب موجب افزایش ۲۱، ۳۰ و ۵۸ درصدی عملکرد دانه گردید و بالاترین عملکرد دانه در شرایط تنش از ترکیب A2B2C4 با میانگین ۴۰۸۱/۶ کیلوگرم در هکتار حاصل شد (جدول ۶). گزارش‌شده با افزایش شدت تنش خشکی عملکرد دانه کاهش یافت اما استفاده از اسید سالیسیلیک به‌صورت محلول‌پاشی عملکرد دانه را افزایش داد (Gholi Nejad et al., 2008). هم‌چنین گزارش‌شده که محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک از طریق تأثیر بر فرایندهای فیزیولوژیک کلزا باعث افزایش ۱۳ درصدی عملکرد دانه شد (Keshavarz and Modares Sanavi, 2014). تنش کم‌آبی باعث کاهش رشد و عملکرد دانه کلزا شد ولی استفاده از کود مرکب آهن، روی و منگنز توانسته تا ۳۵ درصد کاهش عملکرد را جبران کند (Payendeh et al., 2020). احتمالاً عنصر منگنز به‌طور مستقیم از طریق افزایش ترکیبات و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و به‌طور غیرمستقیم از طریق افزایش سرعت فتوسنتز و متابولیسم نیتروژن (Waraich et al., 2012)، عنصر روی به‌طور مستقیم از طریق سنتز پروتئین لوله گرده و به‌طور غیرمستقیم از طریق تأثیر در مقدار و ترکیب شهد گیاه و جذب حشرات گرده‌افشان در باروری نقش دارد (Borg and Berger, 2015) و عنصر آهن از طریق تولید بیشتر کلروفیل، افزایش طول دوره فتوسنتز و بهبود تولید کربوهیدرات و انتقال آن برای رشد دانه‌ها (Rajaie and Ziaeyan, 2009) موجب افزایش عملکرد دانه شدند. همگی این نتایج با نتایج تحقیق حاضر هم‌خوانی دارد. محلول‌پاشی کود ریزمغذی و اسید سالیسیلیک توانست ضمن افزایش مقاومت به شرایط تنش کم‌آبی، از طریق بهبود ویژگی‌های رشدی و فیزیولوژیک گیاه ازجمله و افزایش رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی شرایط مساعدی را برای رشد مطلوب‌تر گیاه فراهم نموده و نهایتاً باعث افزایش عملکرد دانه در هر دو شرایط تنش و عدم تنش گردد.

درصد روغن

نتایج تجزیه واریانس ساده داده‌ها نشان داد اثرهای ساده تنش، کود، اسید سالیسیلیک، برهم‌کنش‌های دوگانه تنش در اسید سالیسیلیک و کود در اسید سالیسیلیک و برهم‌کنش سه‌گانه تنش در کود در اسید سالیسیلیک در سطح احتمال یک درصد بر صفت درصد روغن معنی‌دار شد (جدول ۵). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بالاترین درصد روغن از ترکیب تیماری A1B2C3 با میانگین ۴۵/۷ درصد حاصل شد. درصد روغن در شرایط تنش نسبت به عدم تنش به‌طور معنی‌داری (۱۳ درصد) کاهش یافت و ترکیب تیماری A2B1C1 با میانگین ۳۶/۴ درصد پایین‌ترین درصد روغن را تولید کرد. کاربرد کود ریزمغذی و غلظت نیم میلی‌مولار اسید سالیسیلیک هرکدام به‌تنهایی موجب افزایش معنی‌دار درصد روغن شدند، اما کاربرد هم‌زمان این ترکیبات اثر مثبت و معنی‌دار بیشتری داشت و بالاترین درصد روغن از ترکیب A2B2C4 با میانگین ۴۱/۸ درصد حاصل شد (جدول ۶). کاهش درصد روغن به‌موازات اعمال تنش آبیاری بعد از گل‌دهی را می‌توان به کاهش سطح برگ، اختلال در فتوسنتز به‌واسطه تنش خشکی و کاهش تولید مواد فتوسنتزی جهت ارائه به مقصد یا دانه‌ها، یا افزایش میزان تنفس جهت جلوگیری از صدمات تنش نسبت داد. نتایج پژوهشی نشان داد که تنش خشکی باعث کاهش عملکرد دانه، درصد روغن و عملکرد روغن شد اما محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی بر عملکرد دانه، درصد روغن و عملکرد روغن اثر مثبت و معنی‌دار داشت (Payendeh et al., 2018). به نظر می‌رسد کم‌تر بودن درصد روغن در شرایط کمبود آب به علت کاهش غلظت روغن دانه از یک‌سو به دلیل کاهش اندازه بذرها و از سوی دیگر به کاهش مقدار کربوهیدرات‌های قابل‌دسترس برای ارسال به اعضای ذخیره کننده، هم‌چنین کاهش فعالیت تعدادی از آنزیم‌های سنتز کننده چربی نظیر لیپاز که منجر به خسارات شدید و گسترده به غشای لیپیدی می‌شود مرتبط دانست. نتایج پژوهشی نشان داد که محلول‌پاشی با عناصر ریزمغذی (آهن، منگنز، روی، بر و مولیبدن) درصد روغن در کلزا را افزایش دادند (Nasri and Khalatbari, 2008). نتایج پژوهش‌های متعدد حاکی از تأثیر عناصر ریزمغذی بر افزایش درصد روغن است (Kamrgi and Glovi, 2012; Ravi et al., 2008). گزارش‌شده که مصرف عناصر ریزمغذی باعث افزایش معنی‌دار درصد روغن و عملکرد روغن در گیاه کلزا نسبت به شرایط عدم مصرف آن شد (Khodabin et al., 2019). می‌توان بیان داشت در این تحقیق کمبود عناصر ریزمغذی نظیر روی و آهن باعث جلوگیری از فعالیت تعدادی از آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان شده که منجر به خسارات شدید و گسترده به غشای لیپیدی می‌شود ولی کاربرد عناصر ریزمغذی در کلزا این مشکل تا حدودی برطرف و درصد روغن را به‌طور معنی‌داری افزایش داد. سالیسیلیک اسید از طریق ایجاد شاخص سطح برگ مناسب و افزایش میزان استفاده از تابش خورشیدی و افزایش سرعت فتوسنتز خالص باعث افزایش عملکرد دانه، درصد روغن و عملکرد روغن شد (Baljani and Shekari, 2012) که این نتایج با نتایج حاصل از این پژوهش مطابقت داشت.

درصد پروتئین

مطابق نتایج تجزیه واریانس ساده داده‌ها اثر ساده تنش، برهم‌کنش دوگانه تنش در اسید سالیسیلیک و برهم‌کنش سه‌گانه تنش در کود در اسید سالیسیلیک در سطح احتمال یک درصد بر صفت پروتئین دانه معنی‌دار شد (جدول ۵). نتایج مقایسه میانگین هم بالاترین درصد پروتئین در شرایط تنش حاصل شد و ترکیب تیماری A2B1C1 با میانگین ۲۷/۲ درصد بیش‌ترین درصد پروتئین را به خود اختصاص داد و ترکیب تیماری A1B1C1 با میانگین ۲۱/۱ درصد کم‌ترین درصد پروتئین را داشت. کاربرد هم‌زمان کود و سالیسیلیک در شرایط عدم تنش بر درصد پروتئین دانه تأثیر معنی‌داری نداشت اما در شرایط تنش کاربرد هم‌زمان کود و سالیسیلیک موجب کاهش درصد پروتئین دانه شد (جدول ۶). نورمحمدی و همکاران (Normohamadi et al., 2010) اظهار نمودند به هنگام بروز تنش خشکی شدت تنفس افزایش یافته و جذب مواد تقلیل و درنتیجه هیدرات‌های کربن ذخیره‌شده کاهش و پروتئین افزایش می‌یابد. نتایج پژوهش دیگری نشان داد که تنش خشکی در مرحله زایشی کلزا باعث کاهش درصد روغن و افزایش درصد پروتئین دانه می‌شود (Edvards and Hartel, 2011). کاربرد اسید سالیسیلیک سبب افزایش تحمل گیاه نسبت به تنش خشکی شده و اثر کمبود آب را تعدیل و همچنین برخی از پارامترهای رشدی را افزایش داده است (Sahraei et al., 2018). کاهش درصد روغن در اثر تنش کم‌آبی می‌تواند به علت اختلال در فرآیندهای متابولیک بذر و خسارت به انتقال آسیمیلات‌ها به دانه باشد. درواقع تنش رطوبتی به‌ویژه در هنگام رسیدگی، درصد روغن را کاهش داده ولی درصد پروتئین را افزایش

می‌دهد که این حالت به دلیل تسریع در رسیدگی گیاه بوده که فرصت کافی برای سنتز روغن از پروتئین‌های ذخیره‌شده در دانه نداشته و بنابراین درصد روغن کاهش خواهد یافت (Ghanbari et al., 2019). عده‌ای از محققان گزارش کردند که کاربرد ریزمغذی‌ها می‌تواند نقش معنی‌داری در افزایش درصد پروتئین دانه داشته باشد. به‌گونه‌ای که بیش‌ترین درصد پروتئین از تیمار کاربرد کود میکرو و کم‌ترین میزان به تیمار شاهد تعلق گرفت (Taher et al., 2010)، همچنین گزارش شده کاربرد هورمون اسید سالیسیلیک بر میزان درصد پروتئین دانه در کلزا معنی‌دار بود و با کاربرد هورمون سالیسیلیک اسید بیش‌ترین درصد پروتئین دانه به میزان ۲۵/۲۵ درصد حاصل شد (Ezzati et al., 2019) که این نتایج با نتایج حاصل از این پژوهش مطابقت داشت.

نتیجه‌گیری نهایی

تنش کم‌آبی، موجب کاهش معنی‌دار غلظت کلروفیل کل، کارتنوئید، سرعت فتوسنتز، سرعت تنفس، عملکرد دانه و درصد روغن و افزایش معنی‌دار درصد پروتئین دانه شد؛ اما محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و عناصر ریزمغذی توانست تا حدی اثرات منفی تنش کم‌آبی بر صفات اندازه‌گیری شده گیاه کلزا را کاهش و با افزایش غلظت رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی، نهایتاً عملکرد دانه را در شرایط عدم تنش (۴۱ درصد) و در شرایط تنش (۵۸ درصد) افزایش دهد. با توجه به مشکل کمبود عناصر ریزمغذی یا جذب آن در خاک‌های آهکی ایران ازجمله لرستان و با توجه به این‌که ترکیبات فنولیکی موجب تسهیل در جذب عناصر غذایی می‌شوند و نقش مثبتی در غلظت رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی و آنزیم‌های مربوط با فتوسنتز دارند و از طرف دیگر باعث انتقال بهتر مواد پرورده از مبدأ به مقصد می‌شوند، رشد بهتر و عملکرد بیشتر گیاهان تیمار شده با این ترکیبات دور از انتظار نیست. استفاده از کود ریزمغذی فرتی‌میکس سه‌گانه (آهن+ روی+ منگنز) با غلظت دو در هزار به همراه غلظت یک و نیم میلی‌مولار سالیسیلیک اسید جهت کاهش اثرات سوء تنش کم‌آبی و حصول عملکرد مناسب توصیه می‌شود.

منابع

Ahmadi, K., Ebadzadeh, H., Hatami, F., Mohammadnia, Sh., Esfandiaripour, E and Abbastaghani, R. 2018. Statistics of Agricultural crops. Information and Communication Technology Center of the Ministry of Agricultural Jihad, Vol. 1 [In Persian].

Akbari, J., Maleki, A., 2018. The effect of ascorbic acid and salicylic acid foliar on vegetative properties and yield and yield components of *Vigna unguiculata* L. under drought stress. Applied Research of Plant Ecophysiology, 4,159-180. [In Persian].

Alizadeh, A., 2002. Drought and the need for management in water consumption. agricultural drought and drought quarterly. No. 3, 3 - 7.

Baljani, R., Shekari, F., 2012. The effect of pretreatment with salicylic acid on the relationship between growth and yield indices in safflower (*Carthamus tinctorius* L.) under drought stress conditions at the end of the season. Journal of Agricultural Knowledge and Sustainable Production. 22, 1-17.

Briat, J.F., Curie, C., F. Gaymard, F., 2007. Iron utilization and metabolism in plants. Current Opinions in Plant Biology. 10, 276-282. https://doi.org/10.1016/j.pbi.2007.04.003

Borg, M., Berger, F., 2015. Chromatin remodelling during male gametophyte development. The Plant Journal. 83, 177-188. https://doi.org/10.1111/tpj.12856

Curie, C., Briat, J.F., 2003. Iron transport and signaling in plants. Annual Review of Plant Biology.54,183:206. https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.54.031902.135018

Din, J., Khan, S. U., Ali, I., Gurmani, A. R., 2011. Physiological and agronomic response of canola varieties to drought stress. Journal of Animal and Plant Sciences. 21, 78-82.

Edvards, J., Hartel, K., 2011. Canola Growth and Development. Department of Primary Industries, State of New South Wales Through, Sydney, Australia.

EI-Tayeb, M. A., 2005. Response of barley grains to the interactive effect of salinity and salicylic acid. Plant Growth Regulation. 45, 215-224. https://doi.org/10.1007/s10725-005-4928-1

Ezzati, N., A, Maleki, A., Fathi, A. 2019. The effect of drought stress and foliar application of gibberellic acid and salicylic acid on

quantitative and qualitative yield of rapeseed (*Brassica napus* L.). Journal of Plant Environmental Physiology, 56, 94-109. [In Persian]. https://dorl.net/dor/20.1001.1.76712423.1398.14.56.5.9

Fani, A., Hasibi, P., Mesgar bashi, M., Mehdi Khanlou, Kh., Seyed Ahmadi, S.A., 2019. Evaluation of the effect of drought stress and silica foliar application on some physiological characteristics of rapeseed cultivars. Scientific Journal of Crop Physiology. 4, 5-15. [In Persian].

FAO., 2018. Foodoutlook. Global Market Analysis. http://www.fao.foodoutlook.com

Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D. Basra, SM. A., 2009. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. Agronomy for Sustainable Development 29, 185-212.

Fateh H., Siosemardeh, A.M., Sharafi, S., 2012. Effect of drought stress on photosynthesis and physiological characteristics of barley, International Journal of Farming and Allied Sciences. 1, 33-42.

Ghanbari, M., Mokhtassi-Bidgoli, A., Talebi-Siah Saran, P., 2019. Effect of bio-fertilizers on yield components, yield, protein and oil of soybean (*Glycine max* L.) Under different irrigation regimes. Journal of Plant Environmental Physiology, 13, 1-15. [In Persian].dor: https://dorl.net/dor/20.1001.1.76712423.1397.13.52.1.0

Gholi Nejad, A., Aynehband, A., Qartapi, A., Bernoush, A., Reza, M., 2008. Evaluation of drought stress on yield, yield components and harvest index of isofluor hybrid sunflower at different levels of nitrogen and plant population in Urmia climatic conditions. Journal of Plant Production. 16, 1-27. [In Persian].

Heidary. A., Bijanzadeh, A., Naderi, A., Imam, Y., 2016. Effect of end-of-season drought stress and salicylic acid on seed yield and plant shading in two rapeseed cultivars. Journal of Crop Physiology. 7.37-53. [In Persian]. https://doi.org/10.22067/JCESC.2022.75768.1152

Idrees, M., Khan, M. A., Naeem, M., Aftab, T., Hashmi, N. Alam, M., 2011. Modulation of defence responses by improving photosynthetic activity, antioxidative metabolism and vincristine and vinblastine accumulation in (*Catharanthus roseus* L.) through salicylic acid under water stress. Russian Agriculture Sciences. 37, 474-482. https://doi.org/10.3103/S1068367411060127

Jaleel, C.A., Manivannan, P., Kishorekumar, A., Sankar, B., Gopi, R., Somasundaram, R., Panneerselvam, R., 2007. Alterations in osmoregulation, antioxidant enzymes and indole alkaloid levels in *Catharanthus roseus* exposed to water deficit. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces 59, 150-157. https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2007.05.001.

Kalantar Ahmadi, S.A., Ebadi, A., Daneshian, J., Siadat, S.A., Jahanbakhsh, S., 2017. Effect of drought stress and foliar application of growth regulators on photosynthetic pigments and seed yield of rapeseed (*Brassica napus* L.) cv. Hyola 401. Iranian Journal Crop Sciences. 18, 196-217. [In Persian]. https://dorl.net/dor/20.1001.1.15625540.1395.18.3.2.5

Kamrgi, H., Glovi, M., 2012. Evaluation of foliar application of iron micronutrients, zinc and zinc on the quantitative and qualitative properties of safflower. Journal of Agricultural Ecology.3,206201. https://doi.org/10.22067/JAG.V4I3.15308

Keshavarz, H., Modares Sanavi, S.A.M., 2014. Effect of salicylic acid on chlorophyll, some growth characteristics and yield of two rapeseed cultivars. Journal of Crop Production. 7, 161-178. [In Persian]. https://doi.org/10.22069/EJCP.2022.6095

Khademi, Z., Rezaei, H., Malakouti, M.J., Mohajer Milani, P., 2001. Optimal nutrition of canola is an important step in increasing yield and improving oil quality (fertilizer recommendation for producers in Iranian soils). Education publication. Karaj. P 31.

Khan, W., Prithiviraj, B., Smith, D., 2003. Photosynthetic responses of corn and soybean to foliar application of salicylates. Journal of Plant Physiology. 160, 48592. https://doi.org/10.1078/0176-1617-00865

Khodabin, Q., Tahmasebi Sarvestani, Z., Shirani Rad, A.J., Modares Sanavi, S.A.M., Bakhshande, A., 2019. The effect of irrigation cut-off and foliar application of zinc and manganese on yield and ecophysiological traits of rapeseed. Iranian Journal of Crop Research. 18,100-85. [In Persian].

Lichtenthaler, H.K., 1987. Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic

biomembranes. Methods in Enzymology. 148, 350-382.

Majidi, M.M., Jafarzadeh, M., Rashidi, F., Mirlohi, A., 2015. Effect of drought stress on yield and some physiological traits in Canola varieties. Journal of Plant Process and Function.3,59-70. https://dorl.net/dor/20.1001.1.23222727.1393.3.9.11.8

Ministry of Agriculture. 2015. Instructions for rapeseed cultivation using French winter hybrid cultivars. Print Agricultural Support Services Company. P. 23.

Moghadam, H.R.T., Ghooshchi, F.H., Zahedi. H., 2018. Effect of UV radiation and elevated CO_2 on physiological attributes of canola (*Brassica napus* L.) grown under water stress | the effect of elevated UV and CO_2 radiation on physiological characteristics of canola (*Brassica napus* L.) cultivated under hydric stress. UDO Agricola. 12, 353- 368.

Mohammadi, H., Javadzadeh, R., Pasban Islam, B., Parviz, L., 2018. Investigation of the effects of drought stress and salicylic acid on growth and physiological parameters of four spring rapeseed cultivars. Iranian Journal of Crop Research.14.4,807-819. d https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.354327.669439

Monajam, S., Ahmadi, A., Mohamadi, V., 2011. Effect of drought stress on on photosynthesis, partitioning of photo- assimilates and grain yield in rapeseed cultivars. Iranian Journal of Crop Sciences. 13, 533-547. [in Persian]. http://dorl.net/dor/20.1001.1.15625540.1390.13.3.7.5

Nasri, M., Khalatbari, V., 2008. Investigation of the effect of micronutrient foliar application concentration on quantitative and qualitative characteristics of rapeseed cultivars in Varamin region. Iranian Journal of Agricultural Knowledge. 2, 213-107. [In Persian]

Normohamadi, GH., Siadat, A.S., Kashsni, A. A., 2010. Crop Growing. Shahid Chamran University of Ahvaz Publications. 446p. [In Persian]

Payendeh, Kh., Mujaddam, M., Droudgar, N., 2018. Application of micronutrients on quantitative and qualitative yield of rapeseed under drought stress conditions. Journal of Crop Physiology. Islamic Azad University of Ahvaz. 10, 23-37. [In Persian].

Payendeh, Kh., Mujaddam, M., Droudgar, N., 2020. Study of quality and yield of rapeseed seed Hayola 401 with composite fertilizers of iron, zinc and manganese under irrigation stress. Journal of Environmental Stresses in Agricultural Sciences. 13, 109-119. [In Persian]. https://doi.org/10.22077/escs.2019.1800.1414

Pirzad, A.R., Tusi, P., darviszadeh, R., 2011. The effect of foliar application of iron and zinc on plant traits and anise essential oil. Iranian Journal of Crop Sciences. 15, 12-23. [InPersian]. https://dorl.net/dor/20.1001.1.15625540.1392.15.1.2.0

Rajaie, M., Ziaeyan, A.H., 2009. Combined effect of zinc and boron on yield and nutrients accumulation in corn. International Journal of Plant Production. 3, 35-440. https://doi.org/10.22069/IJPP.2012.650

Rezaeichiane, A., Khoramdel, S., Molodi, A., Rahimi, A., 2017. Effects of nano chelated zinc and mycorrhizal fungi inoculation on some agronomic and physiological characteristics of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) under drought stress conditions. Iranian Journal of Filed Crops Research. 15, 168-184. [In Persian]. https://doi.org/10.22067/GSC.V15I1.49876

Ravi, S., Channal, H.T., Hebsur, N.S., Patil, B.N., Dharmatti, P.R., 2008. Effect of sulphur, zinc and iron nutrition on growth, yield, nutrient uptake and quality of safflower (*Carthamus tinctorius* L). Karnataka Journal Agriculture Science. 32, 382-385.

Refay, Y.A., 2011. Yield and yield components parameters of bread wheat genotypes as affected by sowing dates. Middle-East Journal Science Research. 7, 484-489.

Sahraei, E., Maleki, A., Pazoki, A., Fathi, A., 2018. The effect of salicylic and ascorbic acid on Ecophysiological characteristics an German chamomile essences in deficit of water. Applied Research of Plant Ecophysiology. 5, 117-142.

Shakirova, M.F., Sakhabutdinova, M.V., Bezrukova, R.A., Fatkhutdinova, F.D., 2003. Changes in the hormonal status of pearl millet seedlings induced by salicylic acid and salinity. Journal of Plant Sciences. 164, 317-322. https://doi.org/10.1016/S0168-9452(02)00415-6

Shah, S.H. 2011. Growth and photosynthetic characteristics of *Nigella sativa* L. as affected by presowing seed treatment with kinetin. Photosynthetica 49, 154-160.

Shi, Q., Bao, Z., Zhu, Z., Ying, Q., Qian, Q., 2006. Effects of different treatments of salicylic acid on heat tolerance, chlorophyll fluorescence and antioxidant enzyme activity in seedlings of *Cucumis sativa* L. Plant Growth Reg. 39, 137-141. https://doi.org/10.1007/s10725-005-5482-6

Taher, M., Roshdi, M., Khalili Mahalleh, J., Kharazmi, K., Haji Hassani Asl, N., 2010. The effect of different methods of micro nutrients usage on yield and yield components of grain corn in Khoy city. Research in Agronomy Siensce.1,72-84. https://doi.org/10.22059/ijfcs.2017.122854.653856

Vahedi, A. 2014. Canola Mechanization. Sokhanvaran Publication. Tehran, Iran.157p. [In Persian].

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. 12,221-244. https://doi.org/10.4067/S0718-95162012000200003