

DOR: 20.1001.1.15625540.1401.24.3.6.1

اثر محلول پاشی عناصر ریزمغذی و اسید سالیسیلیک بر عملکرد و روغن دانه کانولا (*Brassica napus* L.)
رقم نپتون در شرایط تنش خشکیEffect of foliar application of micronutrients and salicylic acid on seed and oil yield
of canola (*Brassica napus* L. cv. Neptune) under drought stress conditionsیونس میر^۱، حامد خسروی^۲، ماشاله دانشور^۳ و احمد اسماعیلی^۴

چکیده

میر، ی.، ح. خسروی، م. دانشور و ا. اسماعیلی. ۱۴۰۱. اثر محلول پاشی عناصر ریزمغذی و اسید سالیسیلیک بر عملکرد و روغن دانه کانولا (*Brassica napus* L.) رقم نپتون در شرایط تنش خشکی. نشریه علوم زراعی ایران. ۲۴ (۳): ۳۰۱-۲۸۵.

بمنظور بررسی اثر محلول پاشی عناصر ریزمغذی و اسید سالیسیلیک بر عملکرد و روغن دانه کانولا در شرایط تنش خشکی، آزمایشی به صورت کرت‌های خرد شده فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در دو سال زراعی ۱۳۹۵-۹۶ و ۹۷-۱۳۹۶ در دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان اجرا شد. تیمارهای آزمایشی شامل آبیاری در دو سطح: آبیاری در ۸۰ درصد ظرفیت مزرعه (بدون تنش) (A₁) و آبیاری در ۳۰ درصد ظرفیت مزرعه (تنش خشکی) (A₂) در کرت‌های اصلی و محلول پاشی ترکیب عناصر آهن، روی و منگنز: صفر (B₁) و غلظت دو در هزار (B₂) و محلول پاشی اسید سالیسیلیک در چهار سطح: صفر (C₁)، ۰/۵ (C₂)، یک (C₃) و ۱/۵ (C₄) میلی‌مولار در کرت‌های فرعی در نظر گرفته شدند. نتایج نشان داد که تنش خشکی باعث کاهش محتوای کلروفیل (۱۲ درصد)، تعداد خورجین در بوته (۲۰/۴ درصد) و افزایش فعالیت آنزیم پراکسیداز (۲۲ درصد) شد. محلول پاشی عناصر ریزمغذی باعث افزایش محتوای کلروفیل (۱۳ درصد) و کاروتنوئیدها (۱۰ درصد) گردید. در تیمار محلول پاشی اسید سالیسیلیک با غلظت ۰/۵ میلی‌مولار، بیشترین میزان روغن دانه (۴۰/۹ درصد) بدست آمد. بالاترین مقدار بهره‌وری آب (۱/۲۶ کیلوگرم بر مترمکعب) در ترکیب تیماری آبیاری در ۸۰ درصد ظرفیت مزرعه، محلول پاشی دو در هزار عناصر کم‌مصرف و محلول پاشی اسید سالیسیلیک ۱/۵ میلی‌مولار (A₁B₂C₄) بدست آمد. بیشترین مقدار عملکرد دانه در سال اول (۴۴۲۷ کیلوگرم در هکتار) از ترکیب تیماری آبیاری در ۸۰ درصد ظرفیت مزرعه، محلول پاشی دو در هزار عناصر ریزمغذی و محلول پاشی اسید سالیسیلیک ۱/۵ میلی‌مولار (A₁B₂C₄) و در سال دوم (۴۹۵۵ کیلوگرم در هکتار) از ترکیب تیماری آبیاری در ۸۰ درصد ظرفیت مزرعه، محلول پاشی دو در هزار عناصر ریزمغذی و محلول پاشی اسید سالیسیلیک یک میلی‌مولار (A₁B₂C₃) بدست آمد. نتایج نشان داد که در شرایط تنش خشکی، مصرف همزمان عناصر ریزمغذی و اسید سالیسیلیک باعث افزایش عملکرد دانه گردیده و باعث افزایش معنی‌دار عملکرد روغن (۱۴۴۹ کیلوگرم در هکتار) نسبت به تیمار شاهد (۸۰۳ کیلوگرم در هکتار) شد. بر اساس نتایج این آزمایش محلول پاشی ترکیب عناصر ریزمغذی آهن، روی و منگنز همراه با غلظت ۱/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک، باعث بهبود عملکرد دانه کانولا در شرایط تنش خشکی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بهره‌وری آب، پراکسیداز، تنش خشکی، عناصر کم‌مصرف و کانولا

مقدمه

کلزا (*Brassica napus* L.) یکی از گیاهان دانه روغنی مهم دنیا به شمار رفته و پس از سویا (*Glycine max* L.) دومین گیاه دانه روغنی یکساله جهان است (FAO, 2018). خشکی و کم آبی مهم ترین عامل محدود کننده زراعت و تولید کلزا به شمار رفته و اثر تنش خشکی بر عملکرد کلزا تابعی از ژنوتیپ، شدت و طول مدت تنش، شرایط آب و هوایی و مراحل رشد گیاه می باشد (Majidi *et al.*, 2015). اثر منفی تنش خشکی در کلزا در مرحله گل دهی، تشکیل و پر شدن دانه بیشتر بوده و باعث تشدید کاهش عملکرد گیاه می شود (Keerthi *et al.*, 2017). نتایج تحقیقات نشان داده است که تنش خشکی باعث افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز و پراکسیداز (Hatamvand *et al.*, 2014) و کاهش میزان کلروفیل (Mohammadi *et al.*, 2019)، کاهش تعداد خورجین در بوته، تعداد دانه در خورجین و وزن هزار دانه (Jaberi *et al.*, 2015) و عملکرد دانه (Payendeh *et al.*, 2020) در گیاه کلزا می شود.

نتایج تحقیقات نشان داده است که علاوه بر استفاده از هیبریدهای متحمل به محیط های تنش زا، استفاده از روش های صحیح به زراعی مانند کوددهی مناسب، مصرف تنظیم کننده های رشد و عناصر موثر در بهبود تحمل گیاه به تنش های محیطی، می توانند باعث بهبود رشد و مصرف بهینه آب در زراعت کلزا شوند (Assefa *et al.*, 2017). سه عنصر آهن، روی و منگنز بیش از سایر عناصر ریزمغذی در امر تغذیه نقش دارند. آهن جزء ضروری بسیاری از آنزیم ها است. آهن جزئی از ناقل ها مثل فرودکسین و سیتوکروم بوده و در تثبیت نیتروژن، تکامل کلروپلاست و فتوسنتز نقش دارد. عنصر روی نقش مهمی در فعالیت آنزیم های دهیدروژناز، پروتیناز، تشکیل RNA و تنظیم کننده های رشد دارد. منگنز کوفاکتور ۳۵ آنزیم بوده و در سیستم های اکسیداسیون و احیا و همچنین در متابولیسم

پروتئین ها، کربوهیدرات ها، لیپیدها و تقسیم سلولی نقش دارد (Marschner, 2012). نتایج یک آزمایش نشان داد که تنش کم آبی باعث کاهش رشد و عملکرد دانه کلزا شد، ولی استفاده از کود مرکب آهن، روی و منگنز باعث جبران ۳۵ درصد از کاهش عملکرد آن شد (Payendeh *et al.*, 2020). گزارش شده است که محلول پاشی عناصر ریزمغذی روی و منگنز باعث افزایش محتوای کلروفیل برگ و کارآیی مصرف آب در گیاه کلزا شد (Khodabin *et al.*, 2019).

اسید سالیسیلیک یک تنظیم کننده رشد است که در فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه نقش مهمی دارد. القای گل دهی، رشد و نمو، تولید اتیلن، تأثیر در باز و بسته شدن روزنه ها و تنفس، از نقش های مهم اسید سالیسیلیک اسید هستند (Akbari and Maleki, 2018). محلول پاشی اسید سالیسیلیک در کلزا باعث افزایش محتوای کلروفیل در تیمارهای قطع آبیاری در مراحل گل دهی و خورجین دهی گردید (Kalantar Ahamadi *et al.*, 2017) و در شرایط تنش خشکی باعث افزایش ۳۱ درصدی عملکرد دانه کلزا شد (Mohammadi *et al.*, 2019).

باتوجه به اهمیت گیاه کلزا در تأمین روغن و نظر به اینکه تنش کم آبی مهم ترین عامل محدود کننده رشد و تولید کلزا در ایران به شمار می رود، نیاز به تحقیقات در زمینه کاهش اثرات منفی تنش کم آبی ضروری به نظر می رسد. با توجه به اثر مثبت مصرف عناصر ریزمغذی و اسید سالیسیلیک در گیاهان مختلف، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی امکان کاهش اثر منفی تنش خشکی با محلول پاشی عناصر ریزمغذی و اسید سالیسیلیک در کانولا اجرا شد.

مواد و روش ها

این پژوهش در دو سال زراعی ۱۳۹۷-۱۳۹۵ در مزرعه کشاورزی دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان در شهرستان خرم آباد با طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۲۲

اجرای آزمایش از عمق صفر تا ۳۰ سانتی متری خاک مزرعه نمونه مرکب تهیه و ویژگی های فیزیکی و شیمیایی آن تعیین شد (جدول ۲). بر مبنای نتایج آزمون خاک (جدول ۲) و عملکرد دانه مورد انتظار کانولا در منطقه، براساس توصیه کودی موسسه آب و خاک کشور (جدول ۳) ۷۰ کیلوگرم در هکتار فسفر (از منبع کود سوپر فسفات تریپل) قبل از کاشت به زمین داده شد. مقدار ۱۴۰ کیلوگرم نیتروژن نیتروژن

دقیقه شرقی و عرض ۳۳ درجه و ۲۹ دقیقه شمالی و با ارتفاع ۱۱۲۵ متر از سطح دریا و میانگین بارندگی سالیانه ۴۹۲/۷ میلی متر و دمای متوسط ۱۷/۳ درجه سانتی گراد (براساس آمار بلندمدت ۵۴ ساله از سال ۱۳۴۰ تا ۱۳۹۴) و اقلیم نیمه خشک (براساس ضرایب دمارتن آمبرژه) انجام شد (جدول ۱). آزمایش به صورت کرت های خرد شده فاکتوریل در قالب طرح بلوک های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. قبل از

جدول ۱- اطلاعات هواشناسی محل اجرای آزمایش (خرم آباد، ۱۳۹۷-۱۳۹۵)

Table 1. Meteorological information of the experiment site (Khorramabad, 2016-2018)

Month	ماه	بارندگی Precipitation (mm)		میانگین دمای هوا Mean of air temperature (°C)		مجموع ساعات آفتابی Total sunny hours	
		۱۳۹۵-۹۶	۱۳۹۶-۹۷	۱۳۹۵-۹۶	۱۳۹۶-۹۷	۱۳۹۵-۹۶	۱۳۹۶-۹۷
		2016-2017	2017-2018	2016-2017	2017-2018	2016-2017	2017-2018
October	مهر	0	0	19.8	20.4	277.1	302.4
November	آبان	8.6	2.8	15.5	15.7	220	219.9
December	آذر	66.2	36.6	7.3	7.5	204	194.1
January	دی	82.6	50.1	6.9	7.6	157.6	205.2
February	بهمن	101	68.7	4.2	8.3	184	154.5
March	اسفند	44.3	62.7	9.4	11.7	226.2	207.3
April	فروردین	80.8	103.7	14.0	15.2	198.3	222.7
May	اردیبهشت	32.8	151	20.1	17.2	274.9	194
June	خرداد	0	12	24.5	24.6	382.9	318.6

جدول ۲- مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش

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

Year	سال	کربن آلی OC (%)	فسفر P	پتاسیم K	منگنز آهن Mn Fe Zn			مس Cu	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی EC (dS.m ⁻¹)
					mg.kg ⁻¹					
2016-2017	۱۳۹۵-۹۶	0.67	7.5	258	5	3.8	0.44	0.85	7.7	0.64
2017-2018	۱۳۹۶-۹۷	0.78	7.4	262	4.8	3.8	0.48	0.81	7.6	0.64

بافت خاک: لومی رسی (۳۵ درصد رس، ۳۹ درصد شن و ۲۶ درصد سیلت)، وزن مخصوص ظاهری خاک: ۱/۴۷ گرم بر کیلوگرم و ظرفیت زراعی: ۲۳/۷۰ درصد
Soil texture: clay loam (Clay 35%, Silt 36%, Sand 39%), Bulk density: 1.57 g.kg⁻¹ and Fc: 23.70

جدول ۳- حد بحرانی محتوای عناصر غذایی خاک برای گیاه کلزا

Table 3. Threshold of soil nutrients content for rapeseed (Khademi *et al.*, 2001).

Nutrients	عناصر	منگنز آهن Mn Fe Zn Cu					
		mg.kg ⁻¹					
Concentration	غلظت	15	200	5	5	1	0.8

(A₂) در کرت‌های اصلی محلول‌پاشی ترکیب عناصر آهن، روی و منگنز: صفر (B₁) و غلظت دو در هزار (B₂) و محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک در چهار سطح: صفر (C₁)، ۰/۵ (C₂)، یک (C₃) و ۱/۵ (C₄) میلی‌مولار در کرت‌های فرعی در نظر گرفته شدند. تیمارهای آزمایشی براساس مراحل فنولوژیک کلزا و با استفاده از سیستم کدبندی BBCH اعمال شدند. محلول‌پاشی عناصر کم مصرف آهن، روی و منگنز (از منبع کود مایع فرتی میکس سه گانه) در مرحله روزت (BBCH29) و محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک ساخت شرکت Samchan، کره جنوبی در دو مرحله آغاز گل‌دهی (BBCH60) و پر شدن دانه (BBCH72) انجام شد. محلول‌پاشی با استفاده از سمپاش پشتی (برقی) با نازل شراهی و فشار دو بار انجام شد. محلول‌پاشی در هنگام صبح یا بعدازظهر و در زمانی که وزش باد وجود نداشت انجام شد. جهت جلوگیری از انتقال محلول هر کرت به کرت‌های مجاور، در هنگام محلول‌پاشی از پوشش پلاستیکی در دو طرف هر کرت استفاده شد.

اعمال تنش خشکی هم‌زمان با مرحله خارج شدن گیاه از روزت و آغاز رشد مجدد (BBCH32)، با اندازه‌گیری رطوبت خاک قبل از آبیاری، انجام شد. جهت تعیین زمان آبیاری در فاصله بین دو آبیاری و باگذشت ۴۸ ساعت از آبیاری، روزانه از هر کرت اصلی، یک کرت فرعی به‌طور تصادفی انتخاب و با استفاده از مته نمونه‌برداری، نمونه‌هایی از خاک مزرعه در ناحیه عمق نفوذ مؤثر ریشه تهیه و رطوبت آن اندازه‌گیری شد. با رسیدن رطوبت وزنی خاک در تیمارهای شاهد و تنش به ترتیب به ۱۸/۹ و ۷/۲ درصد، آبیاری انجام شد. حجم آب آبیاری (V_w) با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد (Alizadeh, 2002).

$$V_w = \frac{(FC - Q) \times BD \times D \times A}{E_a} \quad (\text{رابطه ۱})$$

V_w: حجم آب آبیاری (متر مکعب)، FC: درصد وزنی رطوبت در ظرفیت مزرعه، Q: درصد وزنی رطوبت اندازه‌گیری شده، BD: وزن مخصوص ظاهری

(از منبع کود اوره) به‌صورت تقسیط و در سه نوبت؛ یک سوم هم‌زمان با کاشت بذر (به‌صورت پایه همراه با کود فسفر) و باقیمانده آن در دو مرحله پایان روزت و آغاز گل‌دهی به‌صورت سرک مصرف شد (Khademi et al., 2001). براساس نتایج آزمون خاک (جدول ۲) و با توجه به اینکه غلظت عناصر آهن، روی و منگنز در خاک محل اجرای آزمایش پایین‌تر از حد بحرانی بود (جدول ۳)، کمبود این عناصر با استفاده از کود مایع تجاری فرتی میکس سه گانه که از شرکت آرمان مبین پویان (نماینده شرکت تولید کننده Aurantica اسپانیا در ایران) تهیه شد، جبران گردید. این کود حاوی عناصر آهن، روی و منگنز (به ترتیب ۵، ۲ و ۲ درصد وزنی) است که با نسبت دو در هزار (۸۰۰ گرم در ۴۰۰ لیتر آب در هکتار) روی بوته‌ها محلول‌پاشی شد. طول هر کرت آزمایشی پنج و عرض آن دو متر و شامل چهار ردیف کاشت بود. فاصله بوته‌ها روی ردیف پنج سانتی‌متر و فاصله بین ردیف‌ها و فاصله بین کرت‌های مجاور ۵۰ سانتی‌متر، فاصله بین کرت‌های اصلی و فاصله بین بلوک‌ها پنج متر بود. کاشت بذر با تراکم اولیه ۴۰ بوته در مترمربع، پس از آماده‌سازی بستر بذر و اضافه کردن کودهای پایه (نیتروژن، فسفر و پتاسیم)، در پاییز و به‌صورت دستی با عمق کاشت یک سانتی‌متر انجام شد. تاریخ کاشت در هر دو سال ۱۲ مهر بود. برای ایجاد تراکم مورد نظر (۸۰ بوته در مترمربع)، در مرحله چهار تا شش برگی اقدام به تنک بوته‌های اضافی شد. رقم کانولای مورد استفاده در این آزمایش رقم نیتون بود. این رقم در کشورهای فرانسه و مجارستان ثبت شده و دو صفر با تیپ رشد زمستانه، دارای پتانسیل عملکرد بالا، دارای قدرت شاخه‌دهی بالا، ارتفاع متوسط، مقاوم به ریزش دانه و خوابیدگی بوته و متحمل به سرما است (Anonymous, 2015). تیمارهای آزمایشی شامل آبیاری در دو سطح آبیاری در ۸۰ درصد ظرفیت مزرعه (بدون تنش) (A₁) و آبیاری در ۳۰ درصد ظرفیت مزرعه (تنش خشکی)

فضای حاشیه، محصول بوته‌های ۳/۶ مترمربع از هر کرت برداشت و پس از خرمن کوبی و بوجاری توزین شد. وزن هزار دانه بوته‌های هر کرت با شمارش ۱۰۰۰ عدد بذر با استفاده از دستگاه بذرشمار و توزین آنها تعیین شد. برای اندازه‌گیری روغن دانه از دستگاه اتوآنالیزور NIR (GA7250, Perkins, Sweden) استفاده شد. عملکرد روغن از حاصل ضرب درصد روغن دانه در عملکرد دانه بدست آمد. بهره‌وری آب با تعیین نسبت عملکرد دانه در واحد سطح به مقدار آب مصرفی محاسبه شد (Abhari and Gholinezhad, 2019). مجموع مقدار آب آبیاری اندازه‌گیری شده و مقدار بارندگی مؤثر در طول فصل رشد تحت عنوان مقدار آب مصرفی (که تقریباً معادل تبخیر و تعرق گیاه می‌باشد) محاسبه شد (جدول ۴). مقدار بارندگی مؤثر ماهانه در طول دوره رشد گیاه با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد (Ghureshi et al., 1997).
 (رابطه ۲) $125 / [بارندگی کل \times 0.2 - 125]$ بارندگی کل
 [کل] = بارندگی مؤثر ماهانه

خاک (گرم بر سانتی متر مکعب)، D: عمق نفوذ مؤثر ریشه (متر)، A: مساحت کرت (مترمربع)، Ea: کارایی آبیاری هستند. آب مورد نیاز با استفاده از لوله‌های پلی اتیلن و به صورت آبیاری سطحی به کرت‌ها داده شد. کارایی توزیع آب ۹۰ درصد در نظر گرفته شده و حجم آب آبیاری با استفاده از کنتور اندازه‌گیری شد (جدول ۴).

در مرحله گل‌دهی کامل (BBCH67) از پهنک آخرین برگ توسعه یافته و سالم بالای بوته‌های هر کرت نمونه برداری شده و محتوای کلروفیل و کاروتنوئیدها در آنها اندازه‌گیری شدند (Lichtenthaler, 1987). اندازه‌گیری فعالیت آنزیم پراکسیداز برگ با استفاده از روش چانس و ماهلی (Chance and Maehly, 1955) انجام شد. اندازه‌گیری تعداد خورجین در بوته و تعداد دانه در خورجین در هر کرت در پایان رشد بوته‌ها انجام شد. برای تعیین عملکرد دانه، پس از حذف بوته‌های

جدول ۴- مقدار آب مصرفی و تعداد دفعات آبیاری

Table 4. Amount of water used and number of irrigations

Irrigation treatments	تیمارهای آبیاری	2016-2017 ۱۳۹۵-۹۶		2017-2018 ۱۳۹۶-۹۷	
		مقدار آب مصرفی Amount of water used (m ³ .ha ⁻¹)	تعداد آبیاری Number of irrigations	مقدار آب مصرفی Amount of water used (m ³ .ha ⁻¹)	تعداد آبیاری Number of irrigations
80% FC (Normal)	۸۰ درصد ظرفیت مزرعه	3674	5	3716	3
30% FC (Stress)	۳۰ درصد ظرفیت مزرعه	3302	2	3499	1

Amount of water used= Irrigation water + Effective rainfall

مقدار آب مصرفی= آب آبیاری+ بارندگی مؤثر

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان داد که اثر سال بر کلیه صفات مورد ارزیابی معنی دار بود. براساس اطلاعات جدول ۱ میزان بارندگی در سال‌های زراعی ۱۳۹۵-۹۶ و ۹۶-۱۳۹۶ به ترتیب ۴۱۶/۳ و ۴۸۷/۶ میلی‌متر بود که به ترتیب ۷۶/۴ و ۵/۱ میلی‌متر کمتر از میانگین بلندمدت بارندگی محل اجرای

تجزیه داده‌ها بعد از انجام آزمون بارتلت و اثبات همگن بودن واریانس خطای آزمایشی و با در نظر گرفتن سال به عنوان متغیر تصادفی انجام شد. تجزیه واریانس داده‌ها براساس امید ریاضی منابع تغییر با استفاده از نرم‌افزار SAS Ver.9.1 به صورت مرکب و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

آزمایش (۴۹۲/۷ میلی متر) بود و هر دو سال زراعی، سال‌های خشک محسوب می‌شوند.

نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان داد که اثر سال، تنش خشکی، عناصر ریزمغذی و اسید سالیسیلیک، برهمکنش سال در اسید سالیسیلیک بر محتوای کلروفیل برگ معنی‌دار بودند. نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیشترین میزان کلروفیل (۱/۹۳ میلی گرم بر گرم وزن تر) در تیمار بدون تنش حاصل شد و تنش خشکی باعث کاهش ۱۲ درصدی کلروفیل برگ شد. این موضوع می‌تواند به دلیل افزایش فعالیت آنزیم کلروفیلاز در شرایط تنش خشکی باشد (Yang *et al.*, 2016). محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی باعث افزایش معنی‌دار (۱۵ درصد) محتوای کلروفیل برگ نسبت به تیمار عدم مصرف شد (جدول ۵). نتایج نشان داد که در سال اول میزان کلروفیل برگ در کلیه غلظت‌های اسیدسالیسیلیک بالاترین مقدار را داشت و در سال دوم غلظت‌های یک و ۱/۵ میلی مولار بیشترین میزان کلروفیل برگ را داشتند (جدول ۵). نتایج تحقیقات نشان داده است که تنش خشکی در مراحل گل‌دهی و خورجین‌دهی کلزا باعث کاهش میزان کلروفیل a و b شد، اما محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک باعث افزایش ۱۱ درصدی میزان کلروفیل گردید (Mohammadi *et al.*, 2019). اثر مثبت اسید سالیسیلیک بر افزایش محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی می‌تواند در ارتباط با متابولیسم نیتروژن بافت‌ها و بیوستت کلروفیل باشد (Shi *et al.*, 2006). گزارش شده است که مصرف عناصر ریزمغذی باعث افزایش معنی‌دار محتوای کلروفیل در کلزا شد (Khodabin *et al.*, 2019). به نظر می‌رسد که محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی از طریق جبران کمبود عناصر، بویژه آهن، باعث افزایش کلروفیل برگ شد. محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک نیز از طریق افزایش فعالیت آنزیم پراکسیداز، باعث حفاظت از گیاه در مقابل صدمات واکنش‌های اکسیداتیو

گردیده است (جدول ۵).

نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان داد که اثرهای سال، عناصر ریزمغذی و اسیدسالیسیلیک و برهمکنش سال در آبیاری بر محتوای کاروتنوئیدهای برگ معنی‌دار بودند.

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در سال دوم محتوای کاروتنوئیدها نسبت به سال اول بیشتر بود. تیمار محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی باعث افزایش معنی‌دار محتوای کاروتنوئیدها شده و بالاترین میزان کاروتنوئیدها (۰/۴۲ میلی گرم بر گرم وزن تر) بدست آمد. نتایج نشان داد که محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک باعث افزایش معنی‌دار محتوای کاروتنوئیدها شد، بطوریکه با افزایش سطوح اسیدسالیسیلیک، محتوای کاروتنوئیدها بطور پلکانی افزایش یافته و بیشترین میزان کاروتنوئیدها (۰/۴۶ میلی گرم بر گرم وزن تر) در تیمار ۱/۵ میلی مولار اسیدسالیسیلیک حاصل شد که نسبت به عدم مصرف آن ۲۸ درصد بیشتر بود (جدول ۵). گزارش شده است که محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک در شرایط تنش خشکی باعث افزایش میزان کاروتنوئیدهای برگ می‌شود (Kalantar Ahmadi *et al.*, 2017). اسید سالیسیلیک از طریق کاهش سطح رونویسی ژن‌های مرتبط با پیری مانند *SAG102* باعث افزایش میزان کاروتنوئیدها می‌شود (Morris *et al.*, 2000). آهن نیز یک عنصری ضروری برای رشد و نمو گیاهان است و در سنتز کلروفیل، تکامل تیلاکوئیدها و نمو کلروپلاست‌ها دخالت دارد (Marschner, 2012). کمبود آهن در گیاه ضمن کاهش نمو کلروپلاست، با کاهش محسوس کاروتنوئیدها همراه است (Fathi Amirkhiz *et al.*, 2015). محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی با برطرف کردن کمبود آهن خاک و افزایش جذب آهن و محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک با افزایش سنتز کاروتنوئیدها، باعث افزایش محتوای کاروتنوئیدها می‌شوند.

جدول ۵ - مقایسه میانگین صفات گیاهی کانولا در تیمارهای آبیاری و محلول پاشی عناصر ریزمغذی و اسید سالیسیلیک

Table 5. Mean comparison of plant traits of canola in irrigation and foliar application of micronutrients and salicylic acid treatments

سال Year	کلروفیل Chlorophyll (mg.g ⁻¹ FW)	کاروتنوئیدها Carotenoids (mg.g ⁻¹ FW)	پراکسیداز Peroxidase (μmol.mg ⁻¹ FW)	عملکرد دانه Seed yield (kg.ha ⁻¹)	تعداد دانه در خورجین No. Seed.silque ⁻¹
2016-2017 ۱۳۹۵-۹۶	1.78b	0.39b	3.13a	3004b	20b
2017-2018 ۱۳۹۶-۹۷	1.84a	0.41a	2.98b	3704a	22a
کلروفیل					
تیمارهای آبیاری Irrigation treatments		کلروفیل Chlorophyll (mg.g ⁻¹ FW)	پراکسیداز Peroxidase (μmol.mg ⁻¹ FW)		
80% FC (Normal) ۸۰ درصد ظرفیت مزرعه		1.93a	2.70b		
30% FC (Stress) ۳۰ درصد ظرفیت مزرعه		1.70b	3.43a		
کلروفیل					
عناصر ریزمغذی Micronutrient		کلروفیل Chlorophyll (mg.g ⁻¹ FW)	کاروتنوئیدها Carotenoids (mg.g ⁻¹ FW)		
No application عدم محلول پاشی		1.69b	0.38b		
Foliar application (2%) محلول پاشی		1.94a	0.42a		
کاروتنوئیدها					
اسید سالیسیلیک Salicylic acid (mM)		کاروتنوئیدها Carotenoids (mg.g ⁻¹ FW)	عملکرد دانه Seed yield (kg.ha ⁻¹)	روغن دانه Seed oil content (%)	تعداد دانه در خورجین No. Seed.silque ⁻¹
0 (Control) صفر		0.36c	2961c	39.8b	20c
0.5 ۰/۵		0.38b	3283b	40.9a	21bc
1 یک		0.42a	3518a	41.7a	22ab
1.5 ۱/۵		0.43a	3653a	41.5a	22a
کلروفیل					
اسید سالیسیلیک Salicylic acid		کلروفیل (mg.g ⁻¹ FW)			
		2016-2017 ۱۳۹۵-۹۶	2017-2018 ۱۳۹۶-۹۷		
0 (Control) صفر		1.54b	1.65c		
0.5 ۰/۵		1.87a	1.80b		
1 یک		1.90a	1.94a		
1.5 ۱/۵		1.82a	1.98a		

در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، براساس آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی داری ندارند

Means in each column, followed by similar letter(s) are not significantly different at 5% probability level, using Tukey's test

پراکسیداز (۴ میکرومول در میلی گرم وزن تر) در سال اول در ترکیب تیماری بدون تنش + عدم محلول پاشی عناصر ریزمغذی + غلظت یک میلی مولار اسید سالیسیلیک (A₂B₁C₃) و کمترین مقدار آن (۲/۴۵ میکرومول در میلی گرم وزن تر) در ترکیب تیماری بدون تنش + عدم محلول پاشی عناصر ریزمغذی + غلظت ۱/۵ میلی مولار اسید سالیسیلیک (A₁B₁C₄) بدست آمد. در سال دوم بیشترین میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز (۳/۶۹ میکرومول در میلی گرم وزن تر) در ترکیب تیماری (تنش خشکی +

نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان داد که اثرهای سال، آبیاری، برهمکنش سال در اسید سالیسیلیک، برهمکنش سال در آبیاری در اسید سالیسیلیک و سال در عناصر ریزمغذی در اسید سالیسیلیک و برهمکنش سال در آبیاری در عناصر ریزمغذی در اسید سالیسیلیک بر فعالیت آنزیم پراکسیداز معنی دار بودند.

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که فعالیت آنزیم پراکسیداز در تیمار تنش خشکی در سال اول (۱۵ درصد) و در سال دوم (۱۸ درصد) نسبت به تیمار بدون تنش بیشتر بود. بیشترین میزان فعالیت آنزیم

گیاهان است که حاوی آهن بوده و فعالیت آنها تحت تأثیر کمبود آهن قرار می‌گیرد (Marschner, 2012). در شرایط تنش ممکن است ظرفیت آنزیم پراکسیداز جهت از بین بردن گونه‌های اکسیژن فعال کافی نباشد و از اثرات تخریبی تنش اکسیداتیو به خوبی ممانعت نشود؛ بنابراین ساخت مولکول‌های پیام‌رسان، نقش مهمی در درک واکنش‌های گیاه به تنش‌های محیطی دارد. در چنین شرایطی مصرف خارجی مولکول‌های پیام‌رسان چون اسید سالیسیلیک تأثیر زیادی در بهبود تحمل گیاهان به تنش خواهد داشت (Siibi *et al.*, 2014). گزارش شده است که تیمار اسید سالیسیلیک باعث افزایش معنی‌دار آنزیم پراکسیداز در گیاه کلزا شد (Ghassemi-Golezani *et al.*, 2019).

محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی + غلظت یک میلی‌مولار اسید سالیسیلیک ($A_2B_2C_3$) و کمترین مقدار آن (۲/۳۴ میکرومول در میلی‌گرم وزن تر) در ترکیب تیماری بدون تنش + محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی و عدم محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک ($A_1B_2C_1$) بدست آمد. اثر تنش خشکی و محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک با غلظت یک میلی‌مولار در هر دو سال آزمایش یکسان بود، ولی عناصر ریزمغذی اثر متفاوتی داشتند (جدول ۶). نتایج یک آزمایش نیز نشان داد که تنش خشکی باعث افزایش معنی‌دار فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز برگ سه رقم کلزا گردید (Hatamvand *et al.*, 2014). آنزیم پراکسیداز یکی از مهم‌ترین آنزیم‌های خنثی‌کننده پراکسید هیدروژن در

جدول ۶- مقایسه میانگین صفات گیاهی کانولا در برهمکنش تیمارهای آبیاری و محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی و اسید سالیسیلیک

Table 6. Mean comparison of plant traits of canola in interaction effect of irrigation and foliar application of micronutrients and salicylic acid treatments

تیمارهای آبیاری Irrigation treatments	عناصر ریزمغذی Micronutrients	اسید سالیسیلیک Salicylic acid (mM)	پراکسیداز		عملکرد دانه	
			Peroxidase ($\mu\text{mol}\cdot\text{mg}^{-1}\text{FW}$)		Seed yield ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	
			۱۳۹۵-۹۶ 2016-2017	۱۳۹۶-۹۷ 2017-2018	۱۳۹۵-۹۶ 2016-2017	۱۳۹۶-۹۷ 2017-2018
۸۰ درصد ظرفیت مزرعه 80% FC (Normal)	عدم محلول‌پاشی No application	0 صفر	2.70gh	2.46ij	3143de	3520efg
		0.5 ۰/۵	2.97efg	2.74fghi	3414cd	3824cdef
	محلول‌پاشی Foliar application (2‰)	1 یک	2.81g	2.87efg	3679bc	3917cde
		1.5 ۱/۵	2.45h	2.81fgh	3497cd	4121bcd
		0 صفر	2.68gh	2.34j	3430cd	3841cdef
		0.5 ۰/۵	2.87fg	2.51hij	3760bc	4212bc
۳۰ درصد ظرفیت مزرعه 30% FC (Stress)	عدم محلول‌پاشی No application	1 یک	2.90fg	2.69fghi	4003ab	4956a
		1.5 ۱/۵	2.64gh	2.60ghij	4425a	4483ab
	محلول‌پاشی Foliar application (2‰)	0 صفر	3.18def	3.00def	1830i	2580i
		0.5 ۰/۵	3.58bc	3.15cde	1990hi	2806hi
		1 یک	4.00a	3.37abc	2163hi	3050ghi
		1.5 ۱/۵	3.37bcd	3.61ab	2376gh	3350fg
محلول‌پاشی Foliar application (2‰)	0 صفر	3.28cde	3.21cd	2217ghi	3126gh	
	0.5 ۰/۵	3.53bc	3.32bcd	2598fg	3663def	
	1 یک	3.70ab	3.69a	2645fg	3729cdef	
	1.5 ۱/۵	3.45bcd	3.41abc	2895ef	4082bcd	

در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، براساس آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند
Means in each column, followed by similar letter(s) are not significantly different at 5% probability level, using Tukey's test

نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان داد که اسیدسالیسیلیک در سطح احتمال یک درصد و اثرهای

عملکرد دانه به تنش خشکی حساسیت بیشتری دارد. محدودیت آب در مرحله گل دهی باعث ریزش گل ها، سقط گل ها و کاهش تعداد خورجین در بوته می شود (Jaberi *et al.*, 2015). محلول پاشی اسید سالیسیلیک باعث افزایش معنی دار (۱۳ درصد) تعداد خورجین در بوته شد (Ezzati *et al.*, 2019). به نظر می رسد که با محلول پاشی اسید سالیسیلیک تا حدودی حفظ تعادل آب در گیاه برقرار شده و شرایط برای تلقیح گل های بیشتری فراهم شده و در نتیجه تعداد واحدهای زایشی در گیاه افزایش می یابد (Cheraghi *et al.*, 2015).

سال، آبیاری و برهمکنش آبیاری در اسید سالیسیلیک و برهمکنش سال در آبیاری در اسید سالیسیلیک در سطح احتمال پنج درصد بر تعداد خورجین در بوته معنی دار بودند. نتایج مقایسه میانگین ها نشان داد که برهمکنش تنش خشکی در اسید سالیسیلیک باعث کاهش ۲۰/۴ درصدی تعداد خورجین در بوته شد. در هر دو شرایط بدون تنش و تنش محلول پاشی اسید سالیسیلیک باعث افزایش معنی دار تعداد خورجین در بوته شد که غلظت بهینه اسید سالیسیلیک در شرایط بدون تنش یک و در شرایط تنش ۰/۵ میلی مولار بود (جدول ۷). تعداد خورجین در بوته در بین اجزای

جدول ۷- مقایسه میانگین اجزای عملکرد کانولا در برهمکنش تیمارهای آبیاری و محلول پاشی اسید سالیسیلیک

Table 7. Means comparison of yield components of canola in interaction effect of irrigation and foliar

		application of salicylic acid treatments			
Irrigation treatments	تیمارهای آبیاری	اسید سالیسیلیک Salicylic acid (mM)	تعداد خورجین در بوته No. silque.plant ⁻¹	وزن هزار دانه 1000 Seed weight (g)	
80% FC (Normal)	۸۰ درصد ظرفیت مزرعه	0	صفر	92b	4.13b
		0.5	۰/۵	95b	4.26a
		1	یک	102a	4.04bc
		1.5	۱/۵	103a	3.86c
		0	صفر	76d	3.35f
30% FC (Stress)	۳۰ درصد ظرفیت مزرعه	0.5	۰/۵	79cd	3.57e
		1	یک	80c	3.82d
		1.5	۱/۵	80c	3.76d

در هر ستون میانگین هایی که دارای حروف مشترک هستند، بر اساس آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی داری ندارند. Means in each column, followed by similar letter(s) are not significantly different at 5% probability level, using Tukey's test

و پراکنش بهتر آن و هم چنین بیشتر بودن ساعات آفتابی (برتری ۵۶ درصد میزان بارندگی و ۱۱ درصدی تعداد ساعات آفتابی نسبت به سال اول) در مراحل زایشی گیاه مرتبط دانست (جدول ۱). گزارش ها حاکی از کاهش تعداد دانه در خورجین گیاه کلزا در اثر تنش خشکی است (Ezzati *et al.*, 2019). محلول پاشی اسید سالیسیلیک باعث افزایش معنی دار تعداد دانه در خورجین شد. در غلظت های یک و ۱/۵ میلی مولار بیشترین تعداد دانه در خورجین تولید شد

نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان داد که اثرهای سال و اسید سالیسیلیک و برهمکنش سال در آبیاری در سطح احتمال یک درصد و برهمکنش سال در عناصر ریز مغذی در سطح احتمال پنج درصد بر تعداد دانه در خورجین معنی دار بودند. نتایج مقایسه میانگین ها نشان داد که سال دوم (۲۲/۴) تعداد دانه در خورجین بیشتری نسبت به سال اول (۲۰/۸) تولید شد. به نظر می رسد که علت بیشتر بودن تعداد دانه در خورجین در سال دوم به بیشتر بودن میزان بارندگی

(جدول ۷). نتایج یک آزمایش نشان داد که مصرف اسید سالیسیلیک باعث افزایش مثبت و معنی‌دار (۹ درصد) تعداد دانه در خورجین در کلزا شد (Ezzati et al., 2019). این موضوع به اثر بهبود دهنده اسید سالیسیلیک همراه با سایر هورمون‌ها نسبت داده شده است (Keshavarz and Modares Sanavi, 2014).

نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان داد که اثرهای سال، اسید سالیسیلیک و برهمکنش سال در آبیاری، آبیاری در عناصر ریزمغذی، آبیاری در اسید سالیسیلیک و سال در اسید سالیسیلیک در سطح احتمال یک درصد و برهمکنش عناصر ریزمغذی در اسید سالیسیلیک در سطح احتمال پنج درصد بر وزن هزار دانه معنی‌دار بودند. نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که تنش خشکی باعث کاهش ۱۶ درصدی وزن هزار دانه شده و محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی باعث افزایش معنی‌دار وزن هزار دانه در هر دو شرایط بدون تنش (۳ درصد) و تنش (۱۰ درصد) شد (جدول ۸). نتایج نشان داد که بیشترین وزن هزار دانه (۴/۲۶ گرم) در تیمار بدون تنش و محلول‌پاشی ۰/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک حاصل شد و در غلظت‌های بیشتر، وزن هزار دانه کاهش یافت، اما در تیمار تنش اثر مثبت اسید سالیسیلیک مشهودتر بود و تا غلظت یک میلی‌مولار وزن هزار دانه افزایش یافت (جدول ۷). گزارش شده است که مصرف سالیسیلیک اسید باعث افزایش معنی‌دار وزن صد دانه در گیاه کلزا گردید

(Keshavarz and Modares Sanavi, 2014). نتایج نشان داد که کمترین وزن هزار دانه در تیمار عدم محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی و اسید سالیسیلیک و بیشترین وزن هزار دانه در تیمار همزمان عناصر ریزمغذی و غلظت ۰/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک حاصل شدند (جدول ۹). نتایج یک آزمایش در کلزا نشان داد که بیشترین وزن هزار دانه (۳/۲ گرم) در تیمار محلول‌پاشی با روی و آهن بدست آمد (Khodabin et al., 2019). تنش خشکی در مراحل گل‌دهی و خورجین‌دهی از طریق اختلال در فتوسنتز و کاهش سنتز مواد پرورده، باعث چروکیدگی و کاهش وزن هزار دانه در کلزا می‌شود (Pasban Eslam, 2015). افزایش وزن هزار دانه را می‌توان به دلیل اثرات مفید اسید سالیسیلیک در افزایش جذب عناصر غذایی و انتقال بیشتر مواد پرورده به دانه‌ها در طول دوره پرشدن دانه‌ها نسبت داد (Ashraf et al., 2002).

نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان داد که اثرهای سال و اسید سالیسیلیک و برهمکنش سال در آبیاری و سال در عناصر ریزمغذی، برهم‌کنش سال در عناصر ریزمغذی در اسید سالیسیلیک و برهم‌کنش سال در آبیاری در عناصر ریزمغذی در اسید سالیسیلیک بر عملکرد دانه معنی‌دار بودند. نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در سال اول بیش‌ترین عملکرد دانه (۴۴۲۴ کیلوگرم در هکتار) مربوط به تیمار بدون تنش +

جدول ۸- مقایسه میانگین وزن هزار دانه کانولا در برهمکنش تیمارهای آبیاری و محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی

Table 8. Means comparison of 1000 seed weight of canola in interaction effect of irrigation and foliar

		application of micronutrients treatments		وزن هزار دانه
Irrigation treatments	تیمارهای آبیاری	Micronutrients	عناصر ریزمغذی	1000 Seed weight (g)
80% FC (Normal)	۸۰ درصد ظرفیت مزرعه	No application	عدم محلول‌پاشی	4.03b
		Foliar application (2%)	محلول‌پاشی (۲٪)	4.17a
30% FC (Stress)	۳۰ درصد ظرفیت مزرعه	No application	عدم محلول‌پاشی	3.47d
		Foliar application (2%)	محلول‌پاشی (۲٪)	3.83c

در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، براساس آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند
Means in each column, followed by similar letter(s) are not significantly different at 5% probability level, using Tukey's test

جدول ۹- مقایسه میانگین وزن هزار دانه کانولا در برهمکنش تیمارهای محلول پاشی عناصر ریز مغذی و اسید سالیسیلیک

Table 9. Means comparison of 1000 seed weight of canola in interaction effect of foliar application of micronutrients and salicylic acid treatments

Micronutrients	عناصر ریز مغذی	اسید سالیسیلیک Salicylic acid (mM)	وزن هزار دانه 1000 Seed weight (g)	
No application	عدم محلول پاشی	0	صفر	3.62c
		0.5	۰/۵	3.75b
		1	یک	3.81b
		1.5	۱/۵	3.82b
		0	صفر	3.85b
Foliar application (2%)	محلول پاشی (2%)	0.5	۰/۵	4.09a
		1	یک	4.05a
		1.5	۱/۵	4.01a

در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، براساس آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند
Means in each column, followed by similar letter(s) are not significantly different at 5% probability level, using Tukey's test

اثرات منفی تنش را تا حدی برطرف نموده و باعث افزایش ۳۱ درصدی عملکرد دانه در شرایط تنش خشکی در مرحله خورجین‌دهی کلزاشد (Mohammadi *et al.*, 2019). تنش خشکی باعث کاهش رشد گیاه و عملکرد دانه کلزا شده، ولی استفاده از کود مرکب آهن، روی و منگنز تا ۳۵ درصد کاهش عملکرد را جبران کرد (Payendeh *et al.*, 2020). به نظر می‌رسد که عنصر منگنز بطور مستقیم از طریق افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت و بطور غیرمستقیم از طریق افزایش سرعت فتوسنتز و متابولیسم نیتروژن (Marschner, 2012)، عنصر روی بطور مستقیم از طریق سنتز پروتئین‌ها در لوله گرده و به‌طور غیرمستقیم از طریق تأثیر در مقدار و ترکیب شهد گل‌ها و جذب حشرات گرده‌افشان در تلقیح گل‌ها نقش دارد (Borg and Berger, 2015). عنصر آهن از طریق افزایش تولید کلروفیل، افزایش طول دوره فتوسنتز و بهبود تولید کربوهیدرات‌ها و انتقال آن برای رشد دانه‌ها (Marschner, 2012)، باعث افزایش عملکرد دانه می‌شود. در آزمایش حاضر نیز محلول پاشی عناصر ریز مغذی و اسید سالیسیلیک ضمن افزایش تحمل گیاه به تنش خشکی، از طریق بهبود ویژگی‌های رشدی و فیزیولوژیک گیاه از جمله افزایش رنگدانه‌های

محلول پاشی عناصر ریز مغذی + غلظت ۱/۵ میلی مولار اسید سالیسیلیک (A₁B₂C₄) و کم‌ترین عملکرد دانه (۱۸۲۹ کیلوگرم در هکتار) مربوط به تیمار تنش خشکی + عدم محلول پاشی عناصر ریز مغذی + عدم محلول پاشی اسید سالیسیلیک (A₂B₁C₁) بود (جدول ۶). در سال دوم بیش‌ترین عملکرد دانه (۴۹۵۵ کیلوگرم در هکتار) از ترکیب تیماری بدون تنش + محلول پاشی عناصر ریز مغذی + غلظت یک میلی مولار اسید سالیسیلیک (A₁B₂C₃) و کم‌ترین عملکرد دانه (۲۵۸۰ کیلوگرم در هکتار) نیز به ترکیب تیماری تنش خشکی + عدم محلول پاشی عناصر ریز مغذی + عدم محلول پاشی اسید سالیسیلیک (A₂B₁C₁) تعلق داشت (جدول ۶). تنش خشکی باعث کاهش ۴۲ درصد عملکرد دانه در سال اول و ۲۷ درصد در سال دوم شد، اما محلول پاشی همزمان اسید سالیسیلیک و عناصر ریز مغذی ضمن کاهش اثرات منفی تنش خشکی، باعث افزایش عملکرد دانه به مقدار ۱۰۶۴ کیلوگرم (۵۹ درصد) در سال اول و ۱۵۰۱ کیلوگرم در هکتار (۵۸ درصد) در سال دوم شد (جدول ۶)

گزارش شده است که محلول پاشی اسید سالیسیلیک از طریق افزایش در محتوای پرولین و کربوهیدرات‌های برگ و کاهش پراکسید هیدروژن و مالون دی‌آلدئید،

اسید سالیسیلیک باعث افزایش عملکرد روغن در هر دو تیمار بدون تنش و تنش خشکی گردیده و عملکرد روغن در شرایط بدون تنش ۴۸ درصد و در شرایط تنش حدود ۸۰ درصد افزایش یافتند (جدول ۱۰).

تنش خشکی در مرحله گل‌دهی به‌واسطه اکسیداسیون برخی اسیدهای چرب غیراشباع و کاهش قابلیت تبدیل هیدرات‌های کربن به روغن، باعث کاهش میزان روغن دانه و عملکرد روغن در کلزا می‌شود (Siddique *et al.*, 2008). نتایج یک آزمایش نشان داد که مصرف عناصر ریزمغذی باعث افزایش معنی‌دار میزان روغن دانه و عملکرد روغن در کلزا شد و بیشترین عملکرد روغن، وزن هزار دانه و عملکرد زیستی در تیمار مصرف هم‌زمان دو عنصر روی و منگنز حاصل شد (Khodabin *et al.*, 2019). محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک نیز باعث افزایش عملکرد دانه و عملکرد روغن کلزا شد (Ghassemi-Golezani *et al.*, 2019). هدف اصلی از زراعت کلزا استحصال روغن است، بنابراین عملکرد روغن اهمیت بیشتری نسبت به میزان روغن دانه دارد. دلیل این موضوع کنترل بیشتر میزان روغن دانه توسط عوامل ژنتیکی و تأثیر پذیری بالای عملکرد روغن از تغییرات عملکرد دانه، نسبت به درصد روغن، است. در این زمینه گزارش شده است که در ارزیابی عملکرد روغن کلزا، عملکرد روغن دانه کلزا در واحد سطح بیشتر تابع عملکرد دانه است و افزایش عملکرد دانه سبب ارتقاء عملکرد روغن دانه در هکتار می‌گردد (Khodabin *et al.*, 2019).

نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان داد که اثرهای سال و اسید سالیسیلیک، برهمکنش سال در آبیاری و عناصر ریزمغذی در اسید سالیسیلیک و برهمکنش آبیاری در عناصر ریزمغذی در اسید سالیسیلیک بر بهره‌وری آب معنی‌دار بودند. نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که تنش خشکی باعث کاهش معنی‌دار (۲۸ درصد) بهره‌وری آب گردید. بالاترین بهره‌وری آب (۱/۲۶ کیلوگرم بر مترمکعب) به ترکیب تیماری

فتوسنتزی، باعث مساعدتر شدن شرایط برای رشد گیاه شده و با افزایش اجزای عملکرد دانه، باعث افزایش عملکرد دانه در هر دو شرایط بدون تنش و تنش خشکی شد.

نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان داد که اثر اصلی اسید سالیسیلیک و برهمکنش سال، آبیاری و اسید سالیسیلیک بر میزان روغن دانه معنی‌دار بودند. نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک باعث افزایش میزان روغن دانه شد. کمترین میزان روغن دانه (۳۹/۸ درصد) در تیمار عدم محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و بیشترین میزان روغن دانه (۴۱/۷ درصد) در غلظت یک میلی‌مولار اسید سالیسیلیک بدست آمد (جدول ۵). گزارش شده است که تنش خشکی هرچند باعث افزایش آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی می‌شود، اما باعث کاهش عملکرد دانه و میزان روغن دانه کلزا می‌شود. گزارش شده است که محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، محتوای آب، یکپارچگی غشاها و کلروفیل، باعث بهبود عملکرد دانه و میزان روغن دانه کلزا شد (Ghassemi-Golezani *et al.*, 2019).

نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان داد که اثر سال، اسید سالیسیلیک، برهمکنش عناصر ریزمغذی در اسید سالیسیلیک و برهمکنش سال در آبیاری در اسید سالیسیلیک بر عملکرد روغن دانه معنی‌دار بودند. نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیشترین عملکرد روغن (۲۰۹۵ کیلوگرم در هکتار) از ترکیب تیماری بدون تنش و محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی و غلظت ۱/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک و کمترین عملکرد روغن (۸۰۳ کیلوگرم در هکتار) از ترکیب تیماری تنش خشکی و عدم محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی و اسید سالیسیلیک حاصل شدند. بر اساس نتایج، تنش خشکی باعث کاهش ۴۲ درصدی عملکرد روغن دانه شد، اما محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی و

بدون تنش + محلول پاشی عناصر ریز مغذی + غلظت ۱/۵

جدول ۱۰- مقایسه میانگین عملکرد روغن و بهره‌وری آب کانولا در برهمکنش تیمارهای آبیاری، محلول پاشی عناصر ریز مغذی و اسید سالیسیلیک

Table 10. Means comparison of oil yield and water productivity of canola in interaction effect of irrigation and

foliar application of micronutrients and salicylic acid treatments				
تیمارهای آبیاری Irrigation treatments	عناصر ریز مغذی Micronutrients	اسید سالیسیلیک Salicylic acid (mM)	عملکرد روغن Oil yield (kg.ha ⁻¹)	بهره‌وری آب Water productivity (kg.m ⁻³)
۸۰ درصد ظرفیت مزرعه 80% FC (Normal)	عدم محلول پاشی No application	0 صفر	1377de	0.89gh
		0.5 ۰/۵	1560cd	0.97def
		1 یک	1687bc	1.04cd
	محلول پاشی Foliar application (2%)	1.5 ۱/۵	1557cd	0.99cde
		0 صفر	1575cd	0.97def
		0.5 ۰/۵	1726bc	1.06bc
۳۰ درصد ظرفیت مزرعه 30% FC (Stress)	عدم محلول پاشی No application	1 یک	1908ab	1.13b
		1.5 ۱/۵	2095a	1.26a
		0 صفر	803i	0.64k
	محلول پاشی Foliar application (2%)	0.5 ۰/۵	924hi	0.70jk
		1 یک	1023ghi	0.76ij
		1.5 ۱/۵	1089fgh	0.83hi
محلول پاشی Foliar application (2%)	0 صفر	1019ghi	0.78i	
	0.5 ۰/۵	1224efg	0.91fg	
	1 یک	1265ef	0.93fg	
		1.5 ۱/۵	1449de	1.01cd

در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، براساس آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی داری ندارند

Means in each column, followed by similar letter(s) are not significantly different at 5% probability level, using Tukey's test

شود، افزایش بهره‌وری آب را به دنبال خواهد داشت. عوامل متعددی از طریق تأثیر بر فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه، عملکرد دانه و میزان تلفات آب از گیاه را تحت تأثیر قرار داده و در نتیجه بهره‌وری آب را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Ritchie and Basso, 2007). محلول پاشی عناصر ریز مغذی روی و آهن باعث افزایش بهره‌وری آب در گیاه کلزا شد و گزارش شد که این موضوع می‌تواند مربوط به نقش روی در هدایت روزه‌ای باشد. از طرف دیگر محلول پاشی عناصر ریز مغذی از طریق افزایش عملکرد دانه باعث افزایش بهره‌وری آب در کلزا می‌شود (Khodabin et al., 2019). محلول پاشی اسید سالیسیلیک باعث افزایش بهره‌وری آب در گیاه جو در هر دو شرایط بدون تنش و تنش خشکی شد

میلی مولار اسید سالیسیلیک (A₁B₂C₄) و پایین‌ترین بهره‌وری آب (۰/۶۴ کیلوگرم بر مترمکعب) از ترکیب تیماری تنش خشکی + عدم محلول پاشی عناصر ریز مغذی و اسید سالیسیلیک (A₂B₁C₁) حاصل شد. نتایج یک آزمایش نشان داد که تنش خشکی باعث کاهش معنی‌دار بهره‌وری آب در سه رقم کلزا گردید (Sadeghinejad et al., 2014). محلول پاشی عناصر ریز مغذی و اسید سالیسیلیک باعث افزایش بهره‌وری آب در هر دو شرایط تنش (۳۶ درصد) و بدون تنش (۲۹ درصد) گردید. به نظر می‌رسد که اثر محلول پاشی عناصر ریز مغذی و اسید سالیسیلیک در تیمار تنش خشکی نسبت به شرایط شاهد، موثرتر بوده است (جدول ۱۰). با در نظر گرفتن رابطه بهره‌وری آب، استفاده از هر عامل مدیریتی که باعث بهبود عملکرد

(Abhari and Gholinezhad, 2019).

در هکتار و در سال دوم در شرایط بدون تنش ۱۴۳۵ کیلوگرم و در شرایط تنش ۱۵۰۱ کیلوگرم در هکتار افزایش دادند. براساس نتایج آزمایش حاضر می‌توان نتیجه‌گیری کرد که اگرچه خسارت ناشی از محدودیت آب، به‌ویژه در مراحل ساقه‌روی و گل‌دهی، به‌طور کامل از طریق محلول‌پاشی قابل جبران نیست، اما بهبود معنی‌دار عملکرد دانه با محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی و اسید سالیسیلیک، مقابله با محدودیت آب را تا حد زیادی در دستیابی به عملکرد اقتصادی کانولا امکان‌پذیر می‌سازد. بنابراین محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی آهن + روی + منگنز با غلظت دو در هزار همراه با غلظت ۱/۵ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید جهت کاهش اثرات سوء تنش خشکی و حصول عملکرد مناسب در زراعت کانولا قابل توصیه است.

نتیجه‌گیری

نتایج آزمایش حاضر نشان داد که تنش خشکی، باعث کاهش محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی، تعداد خورجین در بوته، عملکرد دانه و عملکرد روغن و افزایش فعالیت آنزیم پراکسیداز شد. تعداد خورجین در بوته با کاهش ۲۰/۴ درصدی در بین اجزای عملکرد، بیشترین حساسیت را به تنش خشکی داشت. محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و عناصر ریزمغذی تا حدی باعث کاهش اثرات منفی تنش خشکی بر صفات گیاهی کانولا شده و با افزایش محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی، عملکرد دانه را در سال اول، در شرایط بدون تنش ۱۲۸۱ کیلوگرم و در شرایط تنش ۱۰۶۴ کیلوگرم

References

منابع مورد استفاده

- Abhari, A. and E. Gholinezhad. 2019. The effect of salicylic acid foliar application on barley water use efficiency in cut-off condition. Iran. J. Field Crop Sci. 17(2): 157-167. (In Persian with English abstract).
- Akbari, J. and A. Maleki. 2018. The effect of ascorbic acid and salicylic acid foliar application on vegetative properties and yield and yield components of *Vigna unguiculata* L. under drought stress. Plant Ecophysiol. Res. 4 (2):159-180. (In Persian with English abstract).
- Alizadeh, A. 2002. Drought and the need for management in water consumption. J. Drought Agric. Drought. 3: 3-7. (In Persian).
- Anonymous, 2015. Instructions for rapeseed cultivation using French winter hybrid cultivars. Ministry of Jihad Agriculture. Agricultural Support Services organization. (In Persian).
- Ashraf, M., F. Karim and E. Rasul. 2002. Interactive effects of gibberellic acid (GA) and salt stress on growth, ion accumulation and photosynthetic capacity of two spring wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars differing in salt tolerance. J. Plant Growth Regul. 36(1): 49- 59.
- Assefa, Y., P. V. Vara-Prasad, C. Foster, Y. Wright, S. Young, P. Bradley, M. Stamm and I. A. Ciampitti. 2017. Major management factors determining spring and winter canola yield in North America. Crop Sci. 58: 1-16.
- Borg, M. and F. Berger. 2015. Chromatin remodeling during male gametophyte development. Plant. J. 83 (1): 177-188.
- Chance, B. and A. C. Maehly. 1955. Assay of catalase and peroxidase. Method. Enzymol. 2: 764-817.

- Cheraghi, A. M., N. Sajedi and M. Gomarian. 2015.** Response of agronomic, physiological and quality characteristics of rainfed chickpea to salicylic acid and selenium. *J. Pulse. Res.* 5(2): 31-42. (In Persian with English abstract).
- Ezzati, N., A. Maleki and A. Fathi. 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.). *J. Plant Environ. Physiol.* 56 (4): 94-109. (In Persian with English abstract).
- FAO, 2018.** Food Outlook. Global Market Analysis. <http://www.fao.foodoutlook.com>
- Fathi Amirkhiz, K., M. Amini Dehaghi and S. Heshmati. 2015.** Effect of iron chelate on chlorophyll content, quantum efficiency of photosystem II and some biochemical traits in safflower under dehydrated conditions. *Iran. J. Field Crop Sci.* 46 (1): 137-145. (In Persian with English abstract).
- Ghassemi-Golezani, K., H. M. Bilasvar, A. Dabbagh Mohammadinasab. 2019.** Improving rapeseed (*Brassica napus* L.) plant performance by exogenous salicylic acid and putrescine under gradual water deficit. *Acta Physiol Plant.* 41: 1-8.
- Ghureshi, A. A., M. R. Shariati, R. Jaralahi, M. R. Qhaemi, M. Shahiaiefar and M. M. Tulai. 1997.** Estimation of water requirements of major agricultural and horticultural plants of the country (Volume I). Publications of the Ministry of Jihad Agriculture. (In Persian).
- Hatamvand, M., M. T. Hassanloo, F. Dehghan Nairi and A. H. Shirani Rad. 2014.** Effect of drought stress on catalase, peroxidase and leaf protein content of three rapeseed cultivars. 1st International and 13th National Iranian Crop Science Congress and 3rd Iranian Seed Science and Technology Conference. Aug. 26-28, 2014. Seed and Plant Institute of Iran, Karaj, Iran. (In Persian with English abstract).
- Jaberi, H., B. Lotfi, T. Jamshidnia, A. Fathi, R. Olad and A. Abdollahi. 2015.** Survey of yield of winter canola cultivars under drought stress on the yield at four different phenological stages. *Scientia.* 12(3):144-148.
- Kalantar Ahmadi, S. A., A. Ebadi, J. Daneshian, S. A. Siadat and S. Jahanbakhsh. 2017.** Effect of drought stress and foliar application of growth regulators on photosynthetic pigments and seed yield of rapeseed (*Brassica napus* L.) cv. Hyola401. *Iran. J. Crop Sci.* 18(3): 196-217. (In Persian with English abstract).
- Keerthi, P., R. K. Pannu and A. K. Dhaka. 2017.** Effect of sowing dates and nitrogen levels on total dry matter and its partitioning at different growth stages and yield of Indian mustard (*Brassica juncea* L.). *Agric. Sci. Digest.* 37 (1): 27-31.
- Keshavarz, H. and S. A. M. Modares Sanavi. 2014.** Effect of salicylic acid on chlorophyll, some growth characteristics and yield of two rapeseed cultivars. *J. Crop Prod.* 39: 161-171. (In Persian with English abstract).
- Khademi, Z., H. Rezaei, M. J. Malakouti and P. Mohajer Milani. 2001.** Optimal nutrition of canola is an important step in increasing yield and improving oil quality (fertilizer recommendation for producers in Iranian soils). Agriculture Education Publication. Karaj, Iran. (In Persian).

- Khodabin, Q., Z. Tahmasebi Sarvestani, A. H. Shirani Rad, S. A. M. Modares Sanavi and A. Bakhshande. 2019.** The effect of irrigation cut-off and foliar application of zinc and manganese on yield and ecophysiological traits of rapeseed. *Iran. J. Field Crops Res.* 18 (1):100-85. (In Persian with English abstract).
- Lichtenthaler, H. K. 1987.** Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. *Method. Enzymol.* 148: 350-382.
- Majidi, M. M., M. Jafarzadeh, F. Rashidi and A. Mirlohi. 2015.** Effect of drought stress on yield and some physiological traits in canola varieties. *J. Plant Proc. Func.* 3(9): 59-70. (In Persian with English abstract).
- Marschner, P. 2012.** Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press. (3rd Ed.). USA.
- Mohammadi. H., R. Javadzadeh, B. Pasban Islam and L. Parviz. 2019.** Investigation of the effects of drought stress and salicylic acid on growth and physiological parameters of four spring rapeseed cultivars. *Iran. J. Field Crops Res.* 14 (4): 807-819. (In Persian with English abstract).
- Morris, K., S. A. Mc Kerness, T. Page, C. F. John, A. M. Murphy, J. P. Carr and V. Buchanan-Wollaston. 2000.** Salicylic acid has a role in regulating gene expression during leaf senescence. *J. Plant.* 23: 677-685.
- Payendeh, Kh., M. Mujaddam and N. Droudgar. 2020.** Study of quality and yield of rapeseed seed Hayola401 with composite fertilizers of iron, zinc and manganese under irrigation stress. *J. Environ. Stress. Agric. Sci.* 13 (1): 109-119. (In Persian with English abstract).
- Pasban Eslam, B. 2015.** Stability of grain and oil yields and its components in oilseed rape (*Brassica napus* L.) under early and late season drought. *J. Agric. Sci. Sustain. Prod.* 25(4): 177-187. (In Persian).
- Ritchie, J. T. and B. Basso. 2007.** Water use efficiency is not constant when crop water supply is adequate or fixed: The role of agronomic management. *Eur. J. of Agron.* 28 (3): 273-281.
- Sadeghinejad, A. A., S. A. M. Modarres Sanavi, S. A. Tabatabaei and S. M. Modares Vameghi. 2014.** Effect of water deficit stress at various growth stages on yield, yield components and water use efficiency of five rapeseed (*Brassica napus* L.) cultivars. *Water Soil Sci.* 24 (2): 53-64. (In Persian with English abstract).
- Siddique, Z. S., M. Ajmal Khan, B. Gikim and J. S. Hunag. 2008.** Physiological responses of *Brassica napus* genotypes to combines drought and salt stress. *Plant Stress.* 2(1): 78-83.
- Siibi, M., M. Mirzakhani, M. Gamariyan and S. H. Yaghoubi. 2014.** Effect of water shortage and salicylic acid consumption on oil yield and some physiological characteristics of sunflower cultivars (*Helianthus annuus* L.). *Iran. J. Field Crop Sci.* 45(1) :1-14. (In Persian with English abstract).
- Shi, Q., Z. Bao, Z. Zhu, Q. Ying and Q. Qian. 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.
- Yang, N., C. L. Wang, W. P. He, Y. Z. Qu and Y. S. Li. 2016.** Photosynthetic characteristics and effects of exogenous glycine of *Chorispora bungeana* under drought stress. *Photosynthetica*, 54: 459-467.

Effect of foliar application of micronutrients and salicylic acid on seed and oil yield of canola (*Brassica napus* L. cv. Neptune) under drought stress conditions

Mir, Y.¹, H. Khosravi², M. Daneshvar³ and A. Ismaili⁴

ABSTRACT

Mir, Y., H. Khosravi, M. Daneshvar and A. Ismaili. 2021. Effect of foliar application of micronutrients and salicylic acid on seed and oil yield of canola (*Brassica napus* L. cv. Neptune) under drought stress conditions. *Iranian Journal of Crop Sciences*. 24(3): 285-301. (In Persian).

To investigate the effect of foliar application of micronutrients and salicylic acid on seed and oil yield of canola under drought stress conditions, a field experiment was carried out as split factorial plots arrangements in randomized complete block design in 2016-17 and 2017-18 cropping seasons in Lorestan University, Khorramabad, Iran. Experimental treatments included; irrigation at two levels: (A₁) irrigation at 80% of field capacity (non-stress) and (A₂) irrigation at 30% of field capacity (drought stress) assigned to main plots and foliar application of combination of iron, zinc and manganese elements at two levels: (B₁) zero, and (B₂) concentration of 2‰ and salicylic acid foliar application at four levels: (C₁) zero, (C₂) 0.5, one (C₃) and (C₄) 1.5 mM were randomized in sub-plots. The results showed that water deficit stress decreased total chlorophyll content (12%), Silque number per plant (20.4 silique.plant⁻¹) and increased peroxidase enzyme activity (22%). Application of micronutrients increased chlorophyll content (13%) and carotenoids (10%). Salicylic acid foliar application with concentration of 0.5 mM had the highest seed oil content (40.9%). The highest water productivity (1.26 kg.m⁻³) was obtained in irrigation at 80% of the field capacity, foliar application of two per thousand concentration of iron, zinc and manganese, and foliar application of 1.5 mM salicylic acid (A₁B₂C₄). In 2016-17, the highest seed yield (4427 kg.ha⁻¹) was obtained from the application of irrigation at 80% of the field capacity, foliar application of 2‰ micronutrients and foliar application of 1.5 mM salicylic acid (A₁B₂C₄). In 2017-18, the highest seed yield (4955 kg.ha⁻¹) was obtained irrigation at 80% of the field capacity, foliar application of 2‰ micronutrients and foliar application of one mM salicylic acid (A₁B₂C₃). The results showed that under drought stress conditions, simultaneous application of micronutrients and salicylic acid increased seed yield and significantly increased oil yield (1449 kg.ha⁻¹) as compared with control treatment (803 kg.ha⁻¹). Based on the results of this experiment, foliar application of iron, zinc, and manganese micronutrients together with 1.5 mM salicylic acid improved seed and oil yield of canola under drought stress conditions.

Key words: Canola, Drought stress, Micronutrients, Peroxidase and Water productivity

Received: April, 2022 Accepted: November, 2022

1. PhD Graduated, Lorestan University, Khorramabad, Iran (Corresponding author) (Email: Younesmir80@yahoo.com)

2. PhD Student, Lorestan University, Khorramabad, Iran

3. Assistant Prof., Lorestan University, Khorramabad, Iran

4. Professor, Lorestan University, Khorramabad, Iran