University of Birjand

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

تنشهای محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses In Crop Sciences

*Vol. 16, No. 1, pp. 169-182 (Spring 2023)*

http://dx.doi.org/10.22077/escs.2022.4575.2041

*Original article*

# The effect of foliar application of some micronutrients and salicylic acid on root morphological characteristics and seed yield of rapeseed (*Brassica napus* L.) under water deficit stress

**Y. Mir[1*], H. Khosravi[2], M. Daneshvar[3], A. Imaili[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 9 August 2021; Accepted 20 December 2021

## *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(SA) acid 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, recognition the root system and how it is distributed in the soil is special importance. therefore, the purpose of the present study was to investigate the Effect of foliar application of some micronutrients and salicylic acid on root characteristics and seed 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 in Lorestan University, Iran, in two cropping seasons (2016-2018). water deficit was considered as the main factor in levels irrigation at 80 (control) and 30% of field capacity, and the combination of foliar application of micronutrient fertilizer (non-consumption and spraying at a concentration of 0.2%) and salicylic acid concentration of 0, 0.5, 1 and 1.5 mM were considered in sub-plots. 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 root dry weight, root volume, root area, seed yield, oil percentage, and water use efficiency. 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

© 2023, The Author(s). Published by University of Birjand. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

**Results and discussion**

the results of analysis of variance showed the effect of year on seed yield, effect of salicylic acid on seed yield and oil percentage, double interaction of micronutrient fertilizer in salicylic acid on root volume and triple interaction of stress in micronutrient fertilizer and salicylic acid on root weight, root volume and water use efficiency were significant. the results of comparative analysis of the mean data showed that the highest percentage of oil was obtained from concentration of 1 to 1.5 mM of salicylic acid.the highest root volume (49.90 $cm^3$) was obtained from the treatment composition (foliar application of 1.5 mM salicylic acid and concentration of 2 per thousand micronutrient fertilizers). the highest root dry weight (28.95 gr), root area (4360 $cm^2$) and water use efficiency (1.26 kg $m^{-3}$) from the treatment composition (no stress + 1.5 mM salicylic acid spraying and concentration of 2 per thousand fertilizers Micronutrients) was obtained. the highest seed yield (4955.7 kg $ha^{-1}$) was obtained from foliar application 1.5 mM of salicylic acid, In the first year, the highest seed yield (4427.7 kg $ha^{-1}$) from the combination (no stress + foliar spraying of 1.5 mM salicylic acid and a concentration of 2 per thousand micronutrient fertilizers) and in the second year of the combination (no stress + foliar spraying of 1 mM salicylic acid) and a concentration of 2 per thousand micronutrient fertilizers with an average (4955.7 kg $ha^{-1}$) was obtained.

**Conclusion**

therefore, 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*:** Root area, Root dry weight, Root volume, Seed yield, Water use efficiency

تنشهای محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses in Crop Sciences
جلد شانزدهم، شماره اول، بهار ۱۴۰۲

http://dx.doi.org/10.22077/escs.2022.4575.2041

*مقاله پژوهشی*

# بررسی اثر محلول‌پاشی برخی عناصر ریزمغذی و اسید سالیسیلیک بر خصوصیات ریشه و عملکرد دانه 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. دانشجوی‌دکتری، 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:*
حجم ریشه
سطح ریشه
عملکرد دانه
کارایی مصرف آب
وزن خشک ریشه

تاریخ دریافت:
۱۴۰۰/۰۵/۱۸

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۰/۰۹/۲۹

تاریخ انتشار:
بهار ۱۴۰۲

۱۶(۱): ۱۸۲-۱۶۹

**چکیده**

**به‌منظور بررسی اثر محلول‌پاشی برخی عناصر ریزمغذی و اسید سالیسیلیک بر خصوصیات ریشه و عملکرد دانه کلزا تحت تنش کم‌آبی، آزمایشی به‌صورت اسپلیت پلات فاکتوریل در قالب طرح آماری بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار به مدت دو سال زراعی (۱۳۹۷-۱۳۹۵) در دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان اجرا گردید. آبیاری در دو سطح (آبیاری در ۸۰ درصد ظرفیت زراعی مزرعه و آبیاری در ۳۰ درصد ظرفیت زراعی مزرعه) در کرت‌های اصلی و ترکیب عناصر ریزمغذی (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 درصد روغن از غلظت‌های یک تا یک و نیم میلی‌مولار اسید سالیسیلیک به دست آمد. بیش‌ترین حجم ریشه (۴۹/۹۰ سانتی‌متر مکعب) از ترکیب (محلول‌پاشی ۱/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک و غلظت ۲ در هزار کود ریزمغذی) به دست آمد. بیش‌ترین وزن خشک ریشه (۲۸/۹۵ گرم)، سطح ریشه (۴۳۶۰ سانتی‌متر مربع) و کارایی مصرف آب (۱/۲۶ کیلوگرم بر مترمکعب) از ترکیب (عدم تنش+ محلول‌پاشی ۱/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک و غلظت ۲ در هزار کود ریزمغذی) به دست آمد. در سال اول بیش‌ترین عملکرد دانه (۴۴۲۷/۷ کیلوگرم در هکتار) از ترکیب (عدم تنش+ محلول‌پاشی ۱/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک و غلظت ۲ در هزار کود ریزمغذی) و در سال دوم از ترکیب (عدم تنش+ محلول‌پاشی یک میلی‌مولار اسید سالیسیلیک و غلظت ۲ در هزار کود ریزمغذی) با میانگین (۴۹۵۵/۷ کیلوگرم در هکتار) به دست آمد. استفاده از کود ریزمغذی سه‌گانه (آهن+ روی+ منگنز) با غلظت ۲ در هزار به‌همراه غلظت ۱/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک جهت کاهش اثرات سوء تنش کم‌آبی و حصول عملکرد مناسب در کلزا توصیه می‌گردد.**

## مقدمه

کلزا با نام علمی (*Brassica napus* L.) یکی از گیاهان دانه روغنی مهم در دنیا به شمار رفته (Eyni-Nargeseh et al., 2019) که از نظر تولید روغن کلزا سومین گیاه روغنی در جهان به‌حساب می‌آید (Tan et al., 2017). بر اساس آمار در سال ۲۰۱۸ میزان تولید، سطح زیر کشت و میانگین عملکرد جهانی کلزا به ترتیب حدود ۴۵/۲ میلیون تن و ۷۹/۶ میلیون هکتار و ۹۹۰/۳ کیلوگرم در هکتار بوده است (FAO, 2018). خشکی به‌طورجدی مهم‌ترین عامل محدودکننده رشد و تولید کلزا در ایران به شمار می‌رود (Majidi et al., 2015).

ریشه‌ها نه‌تنها به‌خاطر جذب آب و مواد غذایی بلکه به‌خاطر اینکه بعضی پیام‌های شیمیایی که در ریشه تولید می‌شود و از طریق جریان تعرق به اندام‌های هوایی یعنی جایی که فعالیت‌های فیزیولوژیکی تنظیم می‌شود انتقال

* نگارنده پاسخگو: یونس میر. پست الکترونیک: younesmir80@yahoo.com

می‌یابد، باعث عکس‌العمل مناسب در مقابل خشکی شده و نقش مهمی در کنترل رشد و توسعه اندام‌های هوایی ایفا می‌کند (Zhang and Shan, 2003). تنش خشکی انتهایی فصل از طریق تأثیر بر مؤلفه‌های ریشه ازجمله طول، وزن خشک، حجم و سطح ریشه موجب کاهش عملکرد دانه و درصد روغن کلزا شد (Said Ahmadi et al., 2012).

تنش خشکی از طریق کاهش حلالیت و کاهش جذب عناصر غذایی موجب برهم‌زدن تعادل تغذیه‌ای در گیاه می‌شود (Heydari 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). گیاهان در بین همه ریزمغذی‌ها، بیش‌ترین نیاز را به آهن دارند. آهن در سنتز کلروفیل نقش مهمی دارد و به‌عنوان گیرنده الکترون و فعال‌کننده چندین آنزیم انتقال الکترون در فتوسنتز عمل می‌کند (Irmak et al., 2012). عنصر روی در تشکیل اسید ایندول استیک دخالت و رشد گیاه را تنظیم می‌کند. به‌علاوه این عنصر باعث فعال‌شدن بسیاری از آنزیم‌ها می‌شود به‌طوری‌که برای سنتز کلروفیل و تشکیل کربوهیدرات‌ها لازم و ضروری است (Ma et al., 2017). منگنز در سیستم‌های ترکیبی گیاه مشارکت دارد. در واکنش‌های انتقال الکترون گیاه دخیل بوده و در تولید کلروفیل نیز نقش دارد. وجود منگنز در فتوسیستم II که در فتولیز آب شرکت می‌نمایند، ضروری به‌شمار می‌آید. منگنز به‌عنوان یک فاکتور فعال‌کننده در گیاه عمل می‌کند و باعث فعال‌شدن بسیاری از آنزیم‌ها در گیاه می‌شود. (Obaid and Al- Hadethi. 2013). محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی روی و آهن باعث افزایش کارایی مصرف آب در گیاه کلزا شد (Khodabin et al., 2019).

اسید سالیسیلیک یکی از مولکول‌های سیگنال‌دهنده مهم است که باعث عکس‌العمل گیاه در برابر تنش‌های محیطی می‌شود و با ایجاد توازن در غلظت هورمون‌های گیاهی در کنترل پاسخ‌های گیاه به شرایط نامساعد نقش مهمی دارد (Pirasteh-Anosheh et al., 2015). محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک با افزایش هورمون‌های رشد مانند اکسین و سیتوکینین باعث بهبود طول ریشه از طریق تأثیر بر مریستم انتهایی ریشه می‌شود (Habba et al., 2016). اسید سالیسیلیک موجب افزایش وزن تر و خشک ریشه در گیاهان جو (Metwally et al., 2003) و گندم (Kaydan et al., 2007) گردید. تیمار اسید سالیسیلیک منجر به افزایش وزن صد دانه و عملکرد دانه نسبت به عدم مصرف دو رقم کلزا شد (Keshavarz and Modares Sanavi, 2014). باتوجه‌به نقش کلیدی که ریشه در رشد و نمو گیاهان بازی می‌کند، شناخت دقیق سیستم ریشه و چگونگی توزیع آن در داخل خاک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ همان‌طور که به‌گزینی و اصلاح برای خصوصیات مربوط به اندام هوایی باعث افزایش عملکرد شده، انجام مطالعه در مورد ریشه نیز می‌تواند سبب شناخت عوامل مؤثر بر افزایش عملکرد شده و در شرایط تنش، موفقیت تولید را تضمین کند (Sabzevari et al., 2009). متأسفانه به علت مشکلات نمونه‌برداری و هزینه‌بربودن آن تاکنون مطالعات اندکی در خصوص صفات ریشه کلزا صورت گرفته است، لذا این تحقیق با هدف ارزیابی اثر محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و عناصر ریزمغذی بر خصوصیات ریشه و عملکرد دانه کلزا در شرایط تنش کم‌آبی انجام شد.

## مواد و روش‌ها

این تحقیق به‌صورت اسپلیت‌پلات فاکتوریل در قالب طرح آماری بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار به مدت دو سال زراعی ۱۳۹۷-۱۳۹۵ در دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان با طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۲۲ دقیقه شرقی و عرض ۳۳ درجه و ۲۹ دقیقه شمالی و با ارتفاع ۱۱۲۵ متر از سطح دریا و متوسط بارندگی سالیانه ۴۹۲/۷ میلی‌متر و دمای متوسط ۱۷/۳ درجه سانتی‌گراد و اقلیم نیمه‌خشک انجام شد. مشخصات پارامترهای هواشناسی منطقه در سال اجرای آزمایش در جدول ۱ ارائه‌شده است (اطلاعات هواشناسی ایستگاه سینوپتیک خرم‌آباد). قبل از کاشت به طور تصادفی در چندین نقطه مزرعه از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری خاک مزرعه، نمونه مرکب تهیه و جهت آنالیز خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه اقدام گردید (جدول ۲). بر مبنای نتایج آزمون خاک (جدول ۲) و عملکرد دانه مورد انتظار کلزا با استفاده از جداول توصیه کودی مؤسسه آب‌وخاک کشور (جدول ۳) کود شیمیایی فسفره برحسب سوپر فسفات تریپل ۱۶۰ کیلوگرم در هکتار تعیین و قبل از کاشت به‌کاررفته برده شد. مقدار ۳۱۰ کیلوگرم کود نیتروژن از منبع اوره تعیین (جدول ۳) و این کود به‌صورت تقسیط و در سه نوبت: یک‌سوم هم‌زمان با کاشت (به‌صورت کود پایه همراه با کود فسفره) و باقیمانده آن در دو مرحله پایان روزت و مرحله آغاز گل‌دهی به‌صورت سرک مصرف شد (Khademi et al., 2001).

**جدول ۱. آمار هواشناسی شهرستان خرم‌آباد در طی دوره آزمایش (۱۳۹۵-۱۳۹۷)**

**Table 1. Weather statistics of Khorramabad city during the experimental period (2016-2018).**

| ماه Month | بارندگی Precipitation (mm) | | متوسط دما Mean of air temperature (ºC) | | مجموع ساعات آفتابی Total hours of sunshine | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | First year | Second year | First year | Second year | First year | Second year |
| مهر October | 0 | 0 | 19.8 | 20.4 | 277.1 | 302.4 |
| آبان November | 8.6 | 2.8 | 15.5 | 15.7 | 220 | 219.9 |
| آذر December | 66.2 | 36.6 | 7.3 | 7.5 | 204 | 194.1 |
| دی January | 82.6 | 50.1 | 6.9 | 7.6 | 157.6 | 205.2 |
| بهمن February | 101 | 68.7 | 4.2 | 8.3 | 184 | 154.5 |
| اسفند March | 44.3 | 62.7 | 9.4 | 11.7 | 226.2 | 207.3 |
| فروردین April | 80.8 | 103.7 | 14.0 | 15.2 | 198.3 | 222.7 |
| اردیبهشت May | 32.8 | 151 | 20.1 | 17.2 | 274.9 | 194 |
| خرداد June | 0 | 12 | 24.5 | 24.6 | 382.9 | 318.6 |
| Total | 416.3 | 487.6 | | | | |

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

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

| year | درصد کربن آلی Organic carbon | فسفر P | پتاسیم K | آهن Fe | منگنز Mn | روی Zn | مس Cu | اسیدیته خاک PH | هدایت الکتریکی EC |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | % | ---------- ppm ---------- | | | | | | | $dS\ m^{-1}$ |
| First year | 0.67 | 7.5 | 258 | 5 | 3.8 | 0.44 | 0.85 | 7.7 | 0.64 |
| Second year | 0.78 | 7.4 | 262 | 4.8 | 3.8 | 0.48 | 0.81 | 7.6 | 0.64 |

بافت خاک لوم رس (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).**

| Elements | عناصر | فسفر P | پتاسیم K | آهن Fe | منگنز Mn | روی Zn | مس Cu |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ---------- ppm ---------- | | | | | |
| Element complexity | غلظت عنصر | 15 | 200 | 5 | 5 | 1 | 0.8 |

کل آزمایش ۴۸ کرت داشت، ابعاد هر کرت ۱۰ مترمربع و شامل ۴ خط کاشت بود. فاصله بوته‌ها روی ردیف کشت ۵ سانتی‌متر و فاصله بین خطوط کاشت و فاصله بین کرت‌های مجاور ۵۰ سانتی‌متر، فاصله بین کرت‌های اصلی و همچنین فاصله بین بلوک‌ها ۵ متر بود. جهت اندازه‌گیری خصوصیات مربوط به ریشه و نمونه‌برداری دقیق، قبل از کاشت در داخل هر کرت فرعی گودالی حفر گردیده. سیلندرهایی (قطر دهانهٔ ۴۰ و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر) که به‌منظور جلوگیری از تجمع آب در آن‌ها تعداد ۵ سوراخ به قطر یک سانتی‌متر در کف آن‌ها به‌عنوان زهکش تعبیه‌شده بود در داخل گودال‌ها کار گذاشته شد. پس از پرکردن سیلندرها با خاک و ایجاد پشته، بذرها روی آن‌ها کشت گردید. آبیاری در دو سطح ($A_1$: آبیاری در ۸۰ درصد Fc و $A_2$: آبیاری در ۳۰ درصد Fc) در کرت‌های اصلی و محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی ($B_1$: عدم مصرف و $B_2$: محلول‌پاشی با نسبت ۲ در هزار) و اسید سالیسیلیک در چهار سطح ($C_1$: صفر، $C_2$: ۰/۵، $C_3$: ۱ و $C_4$: ۱/۵ میلی‌مولار) در کرت‌های فرعی مورد مقایسه قرار گرفت. بعد از عملیات کاشت، آبیاری کلیه کرت‌ها تا شروع مرحله روزت به طور یکسان انجام گرفت. اعمال تنش هم‌زمان با مرحله خارج‌شدن 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 به طور 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 گردید (Alizadeh, 2002).

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

دراین‌رابطه 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 گردید. محلول‌پاشی کود ریزمغذی آهن، روی و منگنز (از منبع کود مایع فرتی‌میکس سه‌گانه) به شرح جدول ۳ در مرحله روزت (BBCH29) و محلول‌پاشی هورمون اسید سالیسیلیک در دو مرحله آغاز گل‌دهی (BBCH60) و پرشدن خورجین (BBCH72) انجام گرفت. محلول‌پاشی 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. برای اندازه‌گیری وزن خشک ریشه، نمونه‌برداری در مرحله گلدهی کامل انجام شد. بعد از آبیاری کرت‌ها سیلندرهای نمونه‌برداری از زمین خارج و پس از شستشوی خاک آن‌ها، تعداد ۵ بوته را انتخاب کرده و ریشه آن‌ها جدا گردید سپس به آون با دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت انتقال داده شد، بعد از آن به‌وسیله ترازوی دیجیتالی دقیق توزین و میانگین آن منظور گردید. برای اندازه‌گیری حجم ریشه، ریشه‌ها را مستقیماً در یک سیلندر مندرج و پر از آب وارد کرده و حجم ریشه طبق قانون ارشمیدس برابر است با مقدار اندازه‌گیری حجم آبی که در ظرف جابه‌جا شده است (Alizadeh, 2010). برای اندازه‌گیری سطح ریشه از روش مرسوم به اتکینسون (Atkinson) استفاده شد.

$$\text{سطح‌ریشه } cm^2=۲\times[\text{طول‌ریشه } cm\times ۳/۱۴\times \text{حجم‌ریشه } cm^3]^{۰/۵} \quad [۲]$$

طول‌ریشه با فرمول زیر تخمین زده شد (Alizadeh, 2010).

$$\text{طول ریشه‌ها } (cm^2)=\text{وزن خشک ریشه‌ها } (mg)\times ۰/۸۹۰ \quad [۳]$$

در مرحله رسیدگی کامل با درنظرگرفتن اثر حاشیه‌ای برداشت از مساحت ۳/۶۰ مترمربع انجام گرفت و جهت تعیین عملکرد دانه نمونه‌ها خرمن‌کوبی و مورد عمل بوجاری قرارگرفتن و سپس توزین شدند. میزان درصد روغن دانه کلزا به‌وسیله دستگاه اتوآنالیزور NIR (مدل GA7250 ساخت شرکت پرکنز سوئد) تعیین گردید. کارایی مصرف آب۱ (برحسب عملکرد دانه): کارایی مصرف آب با تعیین نسبت عملکرد دانه در واحد سطح به مقدار آب مصرفی محاسبه گردید (Farre and Faci, 2006). در سال آزمایش، مجموع مقدار آب آبیاری اندازه‌گیری شده و مقدار بارندگی مؤثر۲ در طول فصل رشد تحت عنوان مقدار آب مصرفی (که تقریباً معادل تبخیر و تعرق برای گیاه است) محاسبه شد (جدول ۴). مقدار بارندگی مؤثر ماهانه در طول دوره رشد گیاه از طریق رابطه زیر محاسبه گردید (Ghureshi et al., 1997):

$$\text{بارندگی‌مؤثر ماهانه}=[\text{بارندگی‌کل}\times ۰/۸-۲۵)\text{بارندگی‌کل}\times ۰/۲-۱۲۵)/۱۲۵ \quad [۴]$$

جهت تجزیه آماری داده‌ها از نرم‌افزار SAS.9.1 استفاده شد و مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد صورت گرفت.

## نتایج و بحث

### وزن خشک ریشه

نتایج تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد اثرات اصلی سال، تنش کم‌آبی، اثرهای دوگانه تنش در اسید سالیسیلیک و کود در اسید سالیسیلیک و اثر سه‌گانه تنش در کود در اسید سالیسیلیک بر وزن خشک ریشه معنی‌دار گردید (جدول ۵).

نتایج مقایسه میانگین برهم‌کنش سه‌گانه نشان داد که تنش کم‌آبی باعث کاهش معنی‌دار (۳۹/۵ درصد) وزن ریشه شد. بالاترین وزن ریشه با میانگین (۲۸/۹۵ گرم) از ترکیب تیماری A1B2C4 به دست آمد و پایین‌ترین وزن ریشه با میانگین (۱۵/۲۸ گرم) متعلق به ترکیب تیماری A2B1C1 بود. مصرف کود ریزمغذی و اسید سالیسیلیک باعث افزایش وزن ریشه در هر دو شرایط تنش و عدم تنش شده و توانست وزن ریشه را در شرایط تنش کم‌آبی حدود ۱۲ و در شرایط

[1] Water use efficiency (WUE)

[2] Rainfall Effect

شاهد ۳ درصد بهبود بخشد (جدول ۶). با افزایش تنش خشکی طول ریشه کاهش یافت که دلیل آن عمدتاً مربوط به فشردگی خاک و کاهش و ازبین‌رفتن ریشه‌های مویی بود (Said Ahmadi et al., 2012). بین طول ریشه، ماده خشک ریشه و حجم ریشه رابطه وجود دارد (Mahajan and Tuteja, 2005). لذا کاهش طول ریشه منجر به کاهش مادهٔ خشک ریشه و حجم ریشه شد. علاوه بر این، کاهش حجم ریشه در شرایط خشکی ممکن است منجر به کاهش رشد ریشه شود. کود روی باعث افزایش وزن خشک ریشه در ذرت شد (Sajedi and Sajdi, 2009). تیمار گیاهان با اسید سالیسیلیک، تقسیم سلول‌های یاخته‌ای را در مریستم رأس ریشه افزایش داده و بر رشد گیاه می‌افزاید (Mardani et al., 2011). همگی این نتایج با نتایج آزمایش حاضر هم‌خوانی دارد.

**جدول ۴. میزان آب مصرفی* و تعداد دفعات آبیاری**

**Table 4. The amount of water consumed and number of irrigations**

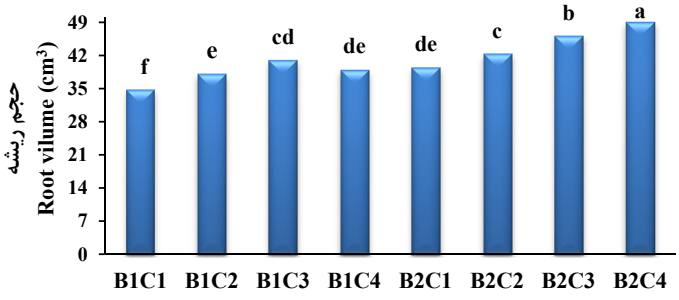
| | | First year | | Second year | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | میزان آب مصرفی The amount of water consumed | تعداد آبیاری Number of irrigations | میزان آب مصرفی The amount of water consumed | تعداد آبیاری Number of irrigations |
| | | $m^3\ ha^{-1}$ | | $m^3\ ha^{-1}$ | |
| **Irrigation in 80%FC** | آبیاری در ۸۰ درصد Fc | 3674 | 5 | 3716 | 3 |
| **Irrigation in 30%FC** | آبیاری در ۳۰ درصد Fc | 3302 | 2 | 3499 | 1 |

میزان آب مصرفی= آب آبیاری+ بارندگی مؤثر

amount of water consumed = irrigation water + effective rainfall

### حجم ریشه

نتایج تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که اثرهای اصلی سال و اسید سالیسیلیک و برهم‌کنش‌های دوگانه سال در تنش کم‌آبی و اسید سالیسیلیک در کود بر صفت حجم ریشه معنی‌دار گردید (جدول ۵). نتایج مقایسه میانگین دوگانه کود ریزمغذی در اسید سالیسیلیک نشان داد کم‌ترین حجم ریشه به میزان ۳۴/۷۶ سانتی‌متر مکعب از ترکیب تیماری B1C1 و بیش‌ترین حجم ریشه به میزان ۴۹/۹۰ سانتی‌متر مکعب از ترکیب تیماری B2C4 به دست آمد (شکل ۱). گزارش‌شده با مصرف کودهای ریزمغذی مخصوصاً سولفات روی و سولفات منگنز، علاوه بر افزایش ریشه‌دهی موجب افزایش تولید گیاه گندم گردید (Moussavi-nik et al., 1997). دلیل افزایش طول، حجم و سایر صفات ریشه و به‌طورکلی رشد گیاه در اثر کاربرد اسید سالیسیلیک به تأثیر مثبت آن بر فتوسنتز خالص و افزایش فعالیت آنزیم‌های نیترات ردوکتاز و کربنیک آنهیدراز نیز ارتباط داده شده است (El-Tayeb, 2005). در تحقیق حاضر نیز مصرف کود ریزمغذی و اسید سالیسیلیک موجب افزایش معنی‌دار حجم ریشه گردید.




**شکل ۱. مقایسه میانگین برهم‌کنش دوجانبه کود ریزمغذی در اسید سالیسیلیک بر حجم ریشه. محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی ($B_1$: عدم مصرف و $B_2$: محلول‌پاشی با نسبت ۲ در هزار) و اسید سالیسیلیک در چهار سطح ($C_1$: صفر، $C_2$: ۰/۵، $C_3$: ۱ و $C_4$: ۱/۵ میلی‌مولار)**

**Fig. 1. Mean comparison of Two way intraction Micronutrient and Salicylic acid on root volume. $B_1$: no consumption of micronutrients and $B_2$: foliar spraying of micronutrients with a ratio of 2 per thousand and salicylic acid at four levels ($C_1$: zero, $C_2$: 0.5, $C_3$: 1 and $C_4$: 1.5 mM).**

**جدول ۵. تجزیه واریانس مرکب دوساله صفات اندازه‌گیری شده در کلزا**

**Table 6. analysis of variance for measured traits of Rapeseed.**

| S.O.V منابع تغییرات | درجه آزادی df | وزن ریشه Root dry weight | حجم ریشه Root volume | سطح ریشه Root area | عملکرد دانه seed yield | درصد روغن oil percentage | کارایی مصرف آب water use efficiency |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| سال Year(Y) | 1 | 279.31$^{**}$ | 444.06$^{**}$ | 142699$^{*}$ | 11749453$^{**}$ | 0.22$^{ns}$ | 0.85693$^{**}$ |
| تکرار Replication | 4 | 4.43$^{ns}$ | 16.63$^{*}$ | 8848.9$^{ns}$ | 7512$^{ns}$ | 0.59$^{ns}$ | 0.00046$^{ns}$ |
| تنش Water stress(A) | 1 | 1628.80$^{*}$ | 4074.6$^{ns}$ | 28502062$^{*}$ | 27496895$^{ns}$ | 473.79$^{ns}$ | 1.15501$^{ns}$ |
| سال× تنش Year* Water stress | 1 | 0.56$^{ns}$ | 118.75$^{*}$ | 156306$^{ns}$ | 1614964$^{**}$ | 6.27$^{ns}$ | 0.07426$^{**}$ |
| خطای A Error (a) | 4 | 14.39 | 7.38 | 35179 | 44280.60 | 1.64 | 0.00325 |
| کود Micronutrient (B) | 1 | 50.56$^{ns}$ | 913.22$^{ns}$ | 2722327$^{ns}$ | 7258498$^{ns}$ | 63.68$^{ns}$ | 0.56580$^{ns}$ |
| اسید سالیسیلیک Salicylic acid(C) | 3 | 68.52$^{**}$ | 274.09$^{**}$ | 1456790$^{**}$ | 2208188$^{**}$ | 18.06$^{*}$ | 0.18021$^{**}$ |
| تنش× کود A*B | 1 | 6.64$^{ns}$ | 69.75$^{ns}$ | 14831$^{ns}$ | 62447.97$^{ns}$ | 0.00$^{ns}$ | 0.01063$^{ns}$ |
| تنش× اسید سالیسیلیک A*C | 3 | 12.14$^{**}$ | 10.90$^{ns}$ | 48143$^{ns}$ | 88153.12$^{ns}$ | 2.05$^{ns}$ | 0.00231$^{ns}$ |
| کود× اسید سالیسیلیک B*C | 3 | 11.20$^{**}$ | 54.88$^{**}$ | 210426$^{**}$ | 81625$^{ns}$ | 7.97$^{ns}$ | 0.01463$^{**}$ |
| سال× کود Y*B | 1 | 1.24$^{ns}$ | 46.36$^{**}$ | 99230$^{*}$ | 102146$^{*}$ | 0.53$^{ns}$ | 0.00683$^{ns}$ |
| Y*C سال× اسید سالیسیلیک | 3 | 0.48$^{ns}$ | 5.47$^{ns}$ | 3648$^{ns}$ | 32537$^{ns}$ | 1.22$^{ns}$ | 0.00218$^{ns}$ |
| تنش× کود× اسید سالیسیلیک A*B*C | 3 | 30.80$^{**}$ | 39.64$^{ns}$ | 362725$^{**}$ | 64370$^{ns}$ | 1.20$^{ns}$ | 0.01063$^{**}$ |
| سال× تنش × کود Y*A*B | 1 | 2.61$^{ns}$ | 0.72$^{ns}$ | 13016$^{ns}$ | 32851.19$^{ns}$ | 1.12$^{ns}$ | 0.00175$^{ns}$ |
| سال×تنش×اسیدسالیسیلیک Y*A*C | 3 | 0.40$^{ns}$ | 1.61$^{ns}$ | 5588$^{ns}$ | 36168.51$^{ns}$ | 2.45$^{*}$ | 0.00037$^{ns}$ |
| سال×کود×اسیدسالیسیلیک Y*B*C | 3 | 0.06$^{ns}$ | 1.12$^{ns}$ | 1793$^{ns}$ | 100865$^{*}$ | 1.34$^{ns}$ | 0.00010$^{ns}$ |
| سال×تنش×کود×اسیدسالیسیلیک Y*A*B*C | 3 | 0.84$^{ns}$ | 4.34$^{ns}$ | 8076$^{ns}$ | 105571$^{**}$ | 1.20$^{ns}$ | 0.00003$^{ns}$ |
| خطای کل Error (T) | 56 | 4.91 | 5.31 | 23628 | 24541 | 0.63 | 0.00179 |
| ضریب تغیرات CV% | | *9.95* | *5.57* | *4.81* | *4.67* | *1.94* | *4.57* |

ns، * و** به ترتیب غیر معنی‌دار، معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد می‌باشند

ns: Non-significat. * and **: Significant at 5 and 1 Percent probability levels, respectively

***سطح ریشه***

نتایج تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که اثرهای اصلی سال، تنش و کود ریزمغذی، برهم‌کنش‌های دوگانه سال در کود و کود در اسید سالیسیلیک و برهم‌کنش سه‌گانه تنش در کود در اسید سالیسیلیک بر صفت سطح ریشه معنی‌دار گردید (جدول ۵). مطابق نتایج مقایسه میانگین برهم‌کنش سه‌گانه تنش کم‌آبی باعث کاهش معنی‌دار (۳۵ درصدی) سطح ریشه شد، بالاترین سطح ریشه به میزان ۴۳۶۴ سانتی‌متر مربع از ترکیب تیماری A1B2C4 به دست آمد و ترکیب تیماری A2B1C1 با میانگین ۲۱۹۶ سانتی‌متر مربع پایین‌ترین سطح ریشه را ایجاد کرد. مصرف کود ریزمغذی و اسید سالیسیلیک باعث افزایش وزن ریشه در هر دو شرایط تنش و عدم تنش شده و توانست سطح ریشه را در شرایط تنش کم‌آبی و شاهد به ترتیب ۲۹ و ۲۲ درصد افزایش دهد (جدول ۶). محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک از طریق افزایش هورمون اکسین و جیبرلین و کاهش آبسیزیک اسید (Hussein et al., 2006) و افزایش فعالیت‌های آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و کاهش رادیکال‌های آزاد اکسیژن ( Gunes

et al., 2007) باعث بهبود رشد ریشه و اندام‌های هوایی می‌شود. به‌طورکلی در هر دو سال آزمایش کاربرد هم‌زمان کود ریزمغذی و اسید سالیسیلیک موجب افزایش معنی‌دار سطح ریشه در هر دو شرایط تنش و شاهد گردید. مطابق روش اتکینسون سطح ریشه رابطه مستقیمی با طول ریشه و حجم ریشه دارد. باتوجه‌به تأثیر مثبت و معنی‌دار کود ریزمغذی و اسید سالیسیلیک بر صفاتی مثل وزن ریشه و حجم ریشه، به نظر می‌رسد کاربرد کود و اسید سالیسیلیک توانسته ضمن تأثیر مؤثر فتوسنتز از طریق افزایش طول و حجم ریشه باعث افزایش سطح ریشه گردد.

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

**Table 7. Means comparison of three way intraction stress in micronutrient in salicylic acid on the measured traits of Rapeseed**

| تیمار Treatment | وزن خشک ریشه Root dry weight | سطح ریشه Root area | کارایی مصرف آب water use efficiency |
|---|---|---|---|
| | gr | $Cm^2$ | kg $ha^{-1}$ |
| **A1B1C1** | $25.25^{abc}$ | $3392.4^{c}$ | $0.89^{gh}$ |
| **A1B1C2** | $26.01^{abc}$ | $3557.9^{c}$ | $0.97^{def}$ |
| **A1B1C3** | $28.15^{ab}$ | $3875.0^{b}$ | $1.04^{cd}$ |
| **A1B1C4** | $24.32^{bc}$ | $3405.3^{c}$ | $0.99^{cde}$ |
| **A1B2C1** | $22.32^{cd}$ | $3347.3^{c}$ | $0.97^{def}$ |
| **A1B2C2** | $28.76^{a}$ | $3942.2^{b}$ | $1.06^{bc}$ |
| **A1B2C3** | $27.39^{ab}$ | $4041.8^{b}$ | $1.13^{b}$ |
| **A1B2C4** | $28.95^{a}$ | $4346.0^{a}$ | $1.26^{a}$ |
| **A2B1C1** | $15.28^{e}$ | $2196.0^{g}$ | $0.64^{k}$ |
| **A2B1C2** | $16.40^{e}$ | $2431.4^{fg}$ | $0.70^{jk}$ |
| **A2B1C3** | $18.2^{de}$ | $2623.8^{ef}$ | $0.76^{ij}$ |
| **A2B1C4** | $18.78^{de}$ | $2719.8^{e}$ | $0.83^{hi}$ |
| **A2B2C1** | $17.18^{e}$ | $2524.9^{ef}$ | $0.78^{i}$ |
| **A2B2C2** | $17.63^{e}$ | $2651.0^{ef}$ | $0.91^{fg}$ |
| **A2B2C3** | $22.37^{cd}$ | $3078.9^{d}$ | $0.93^{fg}$ |
| **A2B2C4** | $19.40^{de}$ | $2963.9^{d}$ | $1.01^{cd}$ |

داده‌های دارای حروف مشترک در هر ستون فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد هستند. $A_1$: آبیاری در ۸۰ درصد Fc و $A_2$: آبیاری در ۳۰ درصد Fc، $B_1$: عدم مصرف عناصر ریزمغذی و $B_2$: محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی با نسبت ۲ در هزار و اسید سالیسیلیک در چهار سطح ($C_1$: صفر، $C_2$: ۰/۵، $C_3$: ۱ و $C_4$: ۱/۵ میلی‌مولار).

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. $A_1$: irrigation at 80% Fc and $A_2$: irrigation at 30% Fc, $B_1$: no consumption of micronutrients and $B_2$: foliar spraying of micronutrients with a ratio of 2 per thousand and salicylic acid at four levels ($C_1$: zero, $C_2$: 0.5, $C_3$: 1 and $C_4$: 1.5 mM).

***عملکرد دانه***

نتایج تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که اثرهای اصلی سال و اسید سالیسیلیک و برهم‌کنش دوگانه سال در تنش و سال در کود، برهم‌کنش سه‌گانه سال در کود در اسید سالیسیلیک و برهم‌کنش چهارگانه سال در تنش در کود در اسید سالیسیلیک بر صفت عملکرد دانه معنی‌دار شد (جدول ۵).

نتایج مقایسه میانگین برهم‌کنش سه‌گانه نشان داد در سال اول بیش‌ترین عملکرد دانه با میانگین ۴۴۲۴/۷ کیلوگرم متعلق به تیمار A1B2C4 (عدم تنش+ محلول‌پاشی کود ریزمغذی+ غلظت یک ونیم میلی‌مولار اسید سالیسیلیک) و کم‌ترین عملکرد دانه با میانگین ۱۸۲۹/۸ کیلوگرم در هکتار متعلق به تیمار A2B1C1 (تنش کم‌آبی+ عدم محلول‌پاشی کود ریزمغذی+ عدم محلول‌پاشی اسیدسالیسیلیک) بود، هرچند که با A2B1C2 اختلاف معنی‌دار نداشت و هر دو در یک کلاس آماری قرار گرفتند (جدول ۶). در سال دوم بیش‌ترین عملکرد دانه با میانگین ۴۹۵۵/۷ کیلوگرم در هکتار از ترکیب تیماری A1B2C3 حاصل شد و کم‌ترین عملکرد دانه هم به ترکیب A2B1C1 با میانگین ۲۵۸۰ کیلوگرم در هکتار تعلق داشت (جدول ۷). به نظر می‌رسد علت برتر بودن

عملکرد در سال دوم نسبت به سال اول را بتوان به بیشتر بودن میزان بارندگی و پراکنش بهتر آن و همچنین بیشتر بودن ساعات آفتابی در زمان گلدهی مرتبط دانست (برتری ۵۶ درصد میزان بارندگی و ۱۱ درصدی تعداد ساعات آفتابی نسبت به سال اول) که به سبب این عوامل رشد گیاه در حالت ایده‌آل بوده و به علت گرده‌افشانی بهتر حشرات گرده‌افشان مثل زنبورعسل، عملکرد افزایش‌یافته است (جدول ۱).

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).

**جدول ۷. مقایسه میانگین اثرات متقابل سه‌جانبه تنش در کود ریزمغذی در اسید سالیسیلیک بر عملکرد دانه کلزا**

**Table 8. Means comparison of three way intraction stress in micronutrient in salicylic acid on seed yield of Rapeseed**

| تیمار | Seed yield | عملکرد دانه |
|---|---|---|
| Treatment | First year | Second year |
| | kg ha$^{-1}$ | |
| **A1B1C1** | 3143.2$^{f}$ | 3520.4$^{fg}$ |
| **A1B1C2** | 3414.5$^{e}$ | 3824.3$^{def}$ |
| **A1B1C3** | 3679.5$^{cd}$ | 3917.2$^{cde}$ |
| **A1B1C4** | 3497.5$^{de}$ | 4121.0$^{cd}$ |
| **A1B2C1** | 3429.9$^{de}$ | 3841.5$^{de}$ |
| **A1B2C2** | 3760.3$^{c}$ | 4211.6$^{bc}$ |
| **A1B2C3** | 4002.6$^{b}$ | 4955.7$^{a}$ |
| **A1B2C4** | 4424.7$^{a}$ | 4482.9$^{b}$ |
| **A2B1C1** | 1829.8$^{l}$ | 2580.0$^{k}$ |
| **A2B1C2** | 1990.4$^{kl}$ | 2806.4$^{jk}$ |
| **A2B1C3** | 2163.4$^{kl}$ | 3050.4$^{ij}$ |
| **A2B1C4** | 2376.0$^{ij}$ | 3350.1$^{gh}$ |
| **A2B2C1** | 2217.1$^{jk}$ | 3126.1$^{hi}$ |
| **A2B2C2** | 2597.6$^{hi}$ | 3662.6$^{ef}$ |
| **A2B2C3** | 2645.0$^{h}$ | 3729.4$^{ef}$ |
| **A2B2C4** | 2894.7$^{g}$ | 4081.6$^{cd}$ |

داده‌های دارای حروف م شترک در هر ستون فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد هستند. $A_1$: آبیاری در ۸۰ درصد Fc و $A_2$: آبیاری در ۳۰ درصد Fc، $B_1$: عدم مصرف عناصر ریزمغذی و $B_2$: محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی با نسبت ۲ در هزار و اسید سالیسیلیک در چهار سطح ($C_1$: صفر، $C_2$: ۰/۵، $C_3$: ۱ و $C_4$: ۱/۵ میلی‌مولار).

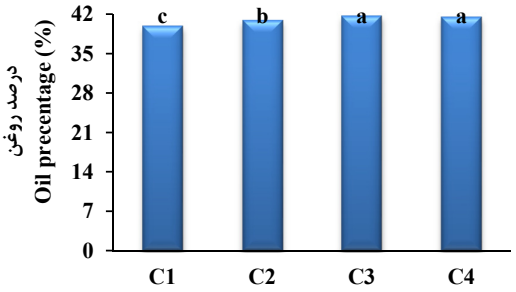
Means in each column and for each treatment, followed by similar letter(s) are not significantly different at 5 Percent of probability level, using Duncan´s Multiple Range Test. $A_1$: irrigation at 80% Fc and $A_2$: irrigation at 30% Fc, $B_1$: no consumption of micronutrients and $B_2$: foliar spraying of micronutrients with a ratio of 2 per thousand and salicylic acid at four levels ($C_1$: zero, $C_2$: 0.5, $C_3$: 1 and $C_4$: 1.5 mM).

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 به طور مستقیم از طریق افزایش ترکیبات و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و به طور غیرمستقیم از طریق افزایش سرعت فتوسنتز و متابولیسم نیتروژن (Waraich et al., 2012)، عنصر روی به طور مستقیم از طریق سنتز پروتئین لوله گرده و به طور 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 افزایش صفات ریشه 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 مرکب داده‌ها نشان داد اثر اصلی اسید سالیسیلیک و اثر سه‌گانه سال در تنش در اسید سالیسیلیک بر صفت درصد روغن دانه معنی‌دار گردید (جدول ۵). نتایج مقایسه میانگین اثر ساده اسید سالیسیلیک نشان داد که کاربرد اسید سالیسیلیک موجب افزایش درصد روغن دانه در کلزا گردید، کم‌ترین درصد روغن با میانگین ۳۹/۸۴ در شرایط عدم کاربرد اسید سالیسیلیک حاصل شد، بیش‌ترین درصد روغن با میانگین ۴۱/۷۹ درصد در شرایط کاربرد غلظت یک میلی‌مولار اسید سالیسیلیک به دست آمد هرچند که بین این غلظت با غلظت ۱/۵ میلی‌مولار اختلاف معنی‌داری وجود نداشت و هر دو در یک کلاس آماری قرار گرفتند (شکل ۲). اعمال تنش آبی، طول دوره پرشدن دانه‌ها را کاهش می‌دهد و باتوجه‌به اینکه قسمت عمده نیتروژن تجمع یافته در دانه در روزهای اول دوره پرشدن دانه به دانه‌ها منتقل می‌شود، بنابراین باعث کاهش تجمع نشاسته (هیدرات‌کربن) در دانه می‌شود و درنتیجه درصد پروتئین دانه افزایش نسبی خواهد داشت. همچنین، با افزایش شدت تنش آبی، مقدار تنفس گیاه

افزایش می‌یابد و از این طریق انرژی نگهداری پایه گیاه بیشتر و از ذخایر چربی گیاه کاسته خواهد شد. درنتیجه، درصد روغن دانه کاهش می‌یابد. مصرف اسید سالیسیلیک نیز در افزایش درصد روغن دانه مؤثر است و موجب افزایش آن نسبت به عدم مصرف اسید سالیسیلیک می‌شود. این نشان‌دهنده آن است که اسید سالیسیلیک به هنگام وجود تنش آبی توانسته مانع از رسیدن آسیب زیاد به گیاه شود و گیاه به‌واسطه برخورد کمتر با شرایط تنش‌زای محیطی توانسته است درصد روغن خود را حفظ و از کاهش بیشتر آن جلوگیری نماید (Sibi et al., 2014).




**شکل ۲. مقایسه میانگین اثر ساده اسید سالیسیلیک بر درصد روغن. اسید سالیسیلیک در چهار سطح ($C_1$: صفر، $C_2$: ۰/۵، $C_3$: ۱ و $C_4$: ۱/۵ میلی‌مولار).**

**Fig. 2. Mean comparison of simple effect of Salicylic acid acid on oil percentage. Salicylic acid at four levels ($C_1$: zero, $C_2$: 0.5, $C_3$: 1 and $C_4$: 1.5 mM).**

### *صفت کارایی مصرف آب*

نتایج تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد اثرهای اصلی سال و اسید سالیسیلیک، اثر دوگانه سال در تنش و کود در اسید سالیسیلیک و اثر سه‌گانه تنش در کود در اسید سالیسیلیک بر صفت کارایی مصرف آب معنی‌دار شد (جدول ۵). نتایج مقایسه میانگین سه‌گانه تنش در کود در اسید سالیسیلیک نشان داد تنش کم‌آبی باعث کاهش معنی‌دار (۲۸ درصد) کارایی مصرف آب در کلزا گردید. بالاترین کارایی با میانگین ۱/۲۶ کیلوگرم بر مترمکعب به ترکیب تیماری A1B2C4 تعلق داشت و پایین‌ترین کارایی هم با میانگین ۰/۶۴ کیلوگرم بر مترمکعب از ترکیب تیماری A2B1C1 حاصل شد. کاربرد کود ریزمغذی و اسید سالیسیلیک باعث افزایش کارایی مصرف آب در هر دو شرایط تنش (۳۶ درصد) و شاهد (۲۹ درصد) گردید (جدول ۶). کمبود روی از یک سو باعث کاهش هدایت روزنه‌ای و در نتیجه کاهش در غلظت $CO_2$ بین سلولی می‌شود. از طرفی، وجود روی در سلول‌ها، بافت‌ها و اندام‌ها سبب فعالیت بیشتر کربنیک آنهیدراز می‌شود. کربنیک آنهیدراز از آنزیم‌های دارای روی است که نقش مهمی در تسهیل انتقال دی‌اکسیدکربن و پروتون‌ها در فضاهای درون‌سلولی و برون سلولی و غشاهای بیولوژیک دارد (Tavallali et al., 2009). محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی روی و آهن باعث افزایش کارایی مصرف آب در گیاه کلزا شد و گزارش گردید این نتیجه می‌تواند مربوط به نقش روی در هدایت روزنه‌ای باشد. از طرف دیگر محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی از طریق افزایش در تولید عملکرد دانه نهایتاً باعث افزایش کارایی مصرف آب می‌گردد (Khodabin et al., 2019). محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک کارایی مصرف آب گیاه جو را در هر دو شرایط تنش و عدم تنش افزایش داد (Abhari and Radman, 2020). همچنین اسید سالیسیلیک باعث افزایش راندمان مصرف آب و میزان تعرق در برگ‌های سویا شد (Khan and Smith, 2003)؛ که همگی این نتایج با نتایج تحقیق حاضر همسو بود. در تحقیق حاضر کاربرد کود ریزمغذی و اسید سالیسیلیک بر سرعت رشد و نمو ریشه و اندام‌های هوایی تأثیر مثبتی داشت و با افزایش عملکرد دانه نهایتاً باعث افزایش کارایی مصرف آب شد.

## نتیجه‌گیری نهایی

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده تنش کم‌آبی، محلول‌پاشی کود ریزمغذی و اسید سالیسیلیک اکثر صفات مورد بررسی را تحت‌تأثیر قرار داد. به‌طورکلی می‌توان گفت در مطالعه حاضر تنش کم‌آبی در طول رشد زایشی کلزا عمدتاً باعث کاهش صفات ریشه (وزن خشک و سطح ریشه) و کارایی مصرف آب گردید؛ محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و عناصر ریزمغذی توانست ضمن افزایش مقاومت به شرایط تنش کم‌آبی، از طریق بهبود ویژگی‌های رشدی و فیزیولوژیک گیاه ازجمله افزایش صفات رشدی ریشه، شرایط مساعدی را برای رشد مطلوب‌تر گیاه فراهم نموده و با افزایش عملکرد دانه، کارایی مصرف آب را در هر دو شرایط تنش و عدم تنش افزایش داد؛ لذا استفاده از کود ریزمغذی فرتی‌میکس سه‌گانه (آهن+روی+منگنز) با غلظت ۲ در هزار به همراه غلظت یک و نیم میلی‌مولار اسید سالیسیلیک جهت کاهش اثرات سوء تنش کم‌آبی و حصول عملکرد مناسب در زراعت کلزا توصیه می‌گردد.

## منابع


Abhari, A., Radman, A., 2020. the effect of salicylic acid on physiological efficiency of nitrogen and water consumption in barley under irrigation stress conditions. Journal of Plant Production Research. 27, 187-200.

Alizadeh, A., 2002. Drought and the need for management in water consumption. Journal of Drought and Agricultural Drought. 3, 3-7. [In Persian with English summary].

Alizadeh, A., 2010. The Relationship between Water, Soil and Plants. Print Astan Quds Razavi. Imam Reza University. P 484. [In Persian].

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. [In Persian with English summary].

Borg, M., Berger, F., 2015. Chromatin remodelling during male gametophyte development. Plant Journal. 83, 177-188.

Eyni-Nargeseh H., M. Aghaalikhani, M., Shirani Rad, A.H., Mokhtassi-Bidgoli, A., Modares Sanavy, S.A.M., 2019. Late season deficit irrigation for water-saving: selection of rapeseed (*Brassica napus* L) genotypes based on quantitative and qualitative features. Archives in Agronomy and Soil Science. 29, 79-95.

EI-Tayeb, M.A., 2005. Response of barley grains to the interactive effect of salinity and salicylic acid. Plant Growth Regulation 45, 215-224.

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

Farre, I., Faci, J.M., 2006. Comparative response of maize (*Zea mays* L.) and sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) to deficit irrigation in a Mediterranean environment. Agricultural water Management. 83, 135- 143.

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 with English summary].

Ghureshi, A.A., Shariati, M.R., Jaralahi, R., Qhaemi, M.R., Shahiaiefar, M., Tulai, M.M., 1997. Estimation of Water Wequirements of Major Agricultural and Horticultural Plants of The Country (Volume I). Publications of the Ministry of Jihad for Agriculture. Page 918. [In Persian].

Gunes, A., Inal, A., Alpaslan, M., Eraslan, F., Bagcl, E.G., Cicek, N., 2007. Salicylic acid induced changes on some physiological parameters sympotomatic for oxidative stress and mineral nutrition in maize (*Zea mays* L.) grown under salinity. Journal of Plant Physiology 164, 728-736.

Habba, E., EL- Abdel Aziz, N.G., Sarhan, A.M. Z., Arafa, A.M.S., Youssef, N.M., 2016. Effect of putrescine and growing media on vegetative growth and chemical constituents of populus euramericana plants. Journal of Innovations in Pharmaceuticals and Biological Sciences. 3, 61-73.

Heydari, M., Gelich, M., Gorbani, H., Baradara Firozabadi, M., 2016. Effect of drought stress and foliar application of iron oxide nanoparticles on grain yield, ion content and photosynthetic pigments in sesame (*Sesamum indicum* L). Iranian Journal of Field Crop Science. 46, 619-628. [In Persian with English summary].

Hussein, M., Nadia, M., EL-Gereadly, H.M., EL-Desuki, M., 2006. Role of putrescine in resistance to salinity of pea plants (*Pisum sativum* L.). Applied Science Research. 2, 598-604.

Imran, A.A.K., Khana, A., 2017. Canola yield and quality enhanced with sulphur fertilization. Russian Agricultural Sciences. 43, 113-119.

Kaydan, D., Yagmur, M., Okut, N., 2007. Effects of salicylic Acid on the Growth and some physiological characters in salt stressed wheat (*Triticum aestivum* L). Tarim Balmier Dergisi. 13, 114-119.

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. [In Persian].

Khan, W., Prithiviraj, B., Smith, D., 2003. Photosynthetic responses of corn and soybean

to foliar application of salicylates. Journal of Plant Physiology, 160, 485-92.

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 with English summary].

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 Field Crop Research. 18, 100-85. [In Persian with English summary].

Ma, D., Sun, D., Wang, C., Ding, H., Qin, H., Hou, J., Huang, X., Xie, Y., Guo, T., 2017. Physiological responses and yield of wheat plants in zinc-mediated alleviation of drought stress. Frontiers in Plant Science. 8, 860.

Mardani, H., Bayat, H., Azizi, M., 2011. Effects of salicylic acid application on morphological and physiological characteristics of cucumber seedling (*Cucumis sativus* cv. Super Dominus) under drought stress. Journal of Horticultural Science. 25, 320-326. [In Persian with English summary].

Mahajan, S., Tuteja, N., 2005. Cold, salinity and drought stresses: an overview Archives of Biochemistry and Biophysics 444, 139–158.

Majidi, MM., 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. [In Persian with English summary].

Metwally, A., Finkemeier, I., George, M., Dietz, K., 2003. Salicylic acid alleviates the cadmium toxicity in Barley seedlings. Plant physiology. 132, 272-281.

Moussavi-Nik, M., Rengel, Z., Hollamby, G.J., Ascher, J.S., 1997. Seed manganese (Mn) content is more important than Mn fertilization for wheat growth under Mn- deficient conditions. In Plant nutrition for sustainable food production and environment. pp. 267-268.

Obaid, E.A., Al-Hadethi, A.E., 2013. Effect of Foliar Application with Manganese and Zinc on Pomegranate Growth, Yield and Fruit Quality. Journal of Horticultural Science and Ornamental Plants. 5, 41-45.

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. Environmental Stresses in Agricultural Sciences.13, 109-119. [In Persian with English summary].

Pirasteh-Anosheh, h., Ranjbar, G., Emam, Y., Sepaskhah, A.R., 2015. Improving barley performance by proper foliar applied salisylic acid under saline conditions. International Journal of Plant Production. 4, 467-486.

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.

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.

Sajedi, N. A., Sajedi, A., 2009. effect of drought stress, mycorrhiza and zinc amount on agrophysiological properties of maize single cross 704. Iranian Journal of Crop Sciences. 11, 202-222. [In Persian with English summary].

Sabzevari, S., Khazaei, H.R., Kafe, M., 2009. Effect of humic acid on root and shoot growth of saioner and sabalan wheat cultivars. Iranian Journal of Field Crops Research. 23, 87-94. [In Persian with English summary].

Said Ahmadi, A., Gharineh, M., Bakhshandeh, A., Fathi,Q., Naderi, A., 2012. Study of the effect of end-of-season drought stress on seed yield, yield components, oil content, protein percentage and canola root characteristics (*Brassica napus* L.) in Ahvaz climate. Journal of Agricultural Products. 2, 53-66. [In Persian with English summary].

Siibi, M., Mirzakhani, M., Gamariyan, M., Yaghubi, S. H., 2014. Effect of water shortage and salicylic acid consumption on oil yield and some characteristics Physiological characteristics of sunflower cultivars (*Helianthus annus* L). Iranian Journal of Field Crop Science, 45, 1-14. [In Persian with English summary].

Tan, M.F., Liao, L., Hou, J., Wang, L., Wei, H., Jian, X., Li, J., 2017. Genome-wide association analysis of seed germination percentage and germination index in *Brassica napus* L. under

salt and drought stresses. Euphytica. 213, 40. https://doi.org/10.1007/s10681-016-1832-x

Tavallali, V., Rahemi, M., Maftoun, M., Panahi, B., Karimi, S., Ramezanian A., Vaezpour. M., 2009. Zinc influence and salt stress on photosynthesis, water relations, and carbonic anhydrase activity in pistachio. Journal of Horticultural Sciences. 123, 272-279.

Zhang, S., Shann, L., 2003. Effect of nitrogen nutrition on endogenous hormone cotent of maize under soil drought conditions. The Journal of Applied Ecology, 14, 1506-6.

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