به‌زراعی کشاورزی
دوره ۲۳ ■ شماره ٤ ■ زمستان ١٤٠٠
صفحه‌های ۷۷۶-۷۶۱
DOI: 10.22059/jci.2021.306872.2424

مقاله پژوهشی:

اثر سیلیکات پتاسیم و تنش خشکی آخر فصل بر خصوصیات فیزیولوژیکی کلزا

مژده سادات خیاط مقدم[1*]، احمد غلامی[2]، امیرحسین شیرانی‌راد[3]، مهدی برادران فیروزآبادی[2]، حمید عباس دخت[2]
۱. دانشجوی دکتری، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود، سمنان، ایران.
۲. دانشیار، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود، سمنان، ایران.
۳. استاد، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۲۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۷/۲۶

چکیده
به‌منظور بررسی اثرات تنش خشکی آخر فصل و محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم بر عملکرد و اجزای عملکرد در ژنوتیپ‌های بهاره کلزا، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل اسپلیت‌پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال‌های زراعی مدت ۹۶-۱۳۹۵ و ۹۷-۱۳۹۶ درمزرعه پژوهشی مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج اجرا شد. عامل آبیاری در دو سطح آبیاری معمول (شاهد) و قطع آبیاری از مرحله خورجین‌دهی به بعد و عامل محلول‌پاشی در دو سطح (محلول‌پاشی با چهار گرم در لیتر سیلیکات‌پتاسیم و عدم محلول‌پاشی) به‌صورت فاکتوریل در کرت‌های اصلی و ژنوتیپ‌های بهاره کلزا شامل DALGAN، RGS003، RGS×OKAPI، RGS×SLM و OG×AL در کرت‌های فرعی قرار گرفتند. نتایج این بررسی نشان داد صفات موردمطالعه تحت تأثیر تیمارهای کاربردی قرار گرفتند. بیش‌ترین عملکرد دانه (۵۶۲۰ کیلوگرم در هکتار) که ۹/٤ درصد نسبت به شاهد افزایش داشت. کلروفیل کل (۱/۷۱ میلی‌گرم در گرم وزن تر) در سطح آبیاری کامل به‌همراه محلول‌پاشی در ژنوتیپ OG×AL به‌دست آمد. تنش خشکی آخر فصل موجب افزایش مقاومت روزنه‌ای، پرولین برگ، کربوهیدارت محلول برگ و کاهش مقدار کلروفیل کل و محتوای نسبی آب برگ شد. در شرایط تنش خشکی ژنوتیپ‌های DALGAN و RGS×SLM از عملکرد بالاتری برخوردار بودند، که حاکی از نمودِ بهتر آن‌ها در شرایط تنش است. سرانجام، مطالعه ما اثر مفید سیلیکات پتاسیم را در بهبود تحمل به تنش خشکی آخر فصل در گیاهان کلزا را نشان داد.

کلیدواژه‌ها: پرولین، قطع آبیاری، کربوهیدارت محلول، کلروفیل کل، محتوای نسبی آب برگ.

The effect of Potassium Silicate and Late-Season Drought Stress on the Physiological Characters of Canola

Mojdeh Sadat Khayat Moghadam[1*], Ahmad Gholami[2], Amir Hossein Shirani Rad[3], Mahdi Baradaran Firoozabadi[2], Hamid Abbasdokht[2]
1. Ph.D. Candidate, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Shahrood University of Technology, Semnan, Iran.
2. Associate Professor, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Shahrood University of Technology, Semnan, Iran.
3. Professor, Seed and Plant Improvement Institute (SPII), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.
Received: September 15, 2020 Accepted: October 17, 2020

Abstract
In order to study the effects of late-season drought stress and foliar application of potassium silicate on yield and yield components of spring genotypes of canola, a factorial split-plot experiment is conducted in Karaj, Iran in a randomized complete block configuration with three replications for two years of cultivation (2016-2018). The irrigation is performed at two levels in this study, including routine irrigation (control) and interruption of irrigation from the pod formation stage. Potassium silicate foliar application at two levels is comprised of 0 and 4 g liter^{-1} in factorial status in main plots and five *Brassica napus* L. genotypes including OG×AL, RGS×SLM, DALGAN, RGS003 and RGS×Okapi in subplots. The results show that the measured properties are affected by the applied treatments. Full irrigation with foliar application in OG×AL genotype results in highest seed yield (5620 Kg/ha) and total chlorophyll content (1.71 mg/g.FW) increase stomatal resistance, leaf proline, leaf soluble and carbohydrates, decreasing total chlorophyll content and relative leaf water content. Under drought stress conditions, DALGAN and RGS× SLM genotypes have higher yield, which indicates its better performance under stress conditions. Finally, our research demonstrates Potassium Silicate's beneficial effects in improving the drought tolerance of canola plants, particularly at the end of the season. Our study will act as a foundation for any attempt in new approaches to mitigate drought damage, establishing a functional connection between the position of potassium silicate, physiological response, and drought stress tolerance in canola plants.

Keywords: Interruption of irrigation, proline, relative leaf water content, solution carbohydrate, total chlorophyll.

* نویسنده مسئول
Email: moghadam.mojde@shahroodut.ac.ir

۱. مقدمه

گیاه زراعی کلزا با نام علمی (*Brassica napus* L.) می‌باشد که کشت عمده آن به‌دلیل استخراج روغن مطرح است. این گیاه پس از نخل روغنی و سویا در جایگاه سوم تولید محصولات روغنی قرار دارد (FAOSTAT, 2019).

یکی از مهم‌ترین عوامل رشد و توسعه گیاه وجود آب می‌باشد و در شرایط تنش خشکی کلزا، با کاهش محتوای نسبی آب برگ[1] و به‌دنبال آن بسته‌شدن روزنه‌ها میزان فعالیت فتوسنتزی کاهش‌یافته و رشد و عملکرد گیاه دچار مشکل می‌شود (Chavoushi *et al*., 2019; Bahador & Tadayon, 2020). با افزایش تنش خشکی در گیاه، تعادل بیولوژیکی سلولی مختل می‌شود و با افزایش مولکول‌های اکسیژن فعال[2] تنش اکسیداتیو رخ می‌دهد و باعث آسیب به غشاها، آنزیم‌های سلولی، پروتئین‌ها، RNA و DNAها می‌شود (Zarrinabadi *et al*., 2019). با افزایش تنش خشکی بر ارقام کلزا محتوای نسبی آب برگ، کلروفیل کل و عملکرد دانه کاهش و مقاومت روزنه‌ای افزایش یافت (Moradi Aghdam *et al*., 2018). قطع آبیاری در مرحله تشکیل غلاف کاهش عملکرد و اجزای عملکرد دانه کلزا را به‌همراه داشت (Payandeh *et al*., 2018). پرولین یک تنظیم‌کننده اسمزی بوده که موجب سازش سلول گیاهی در شرایط تنش‌زا می‌شود. جهت حفظ لیپیدهای غشا، پرولین افزایش می‌یابد و با افزایش فعالیت آنزیم‌ها و پروتئین‌های دفاعی، در حفظ ساختمان کلروپلاست دستگاه فتوسنتز و کاهش تنش اکسیداتیو حاصل از تنش نقش دارد (Ashraf & Foolad., 2007). افزایش غلظت کربوهیدرات محلول بر اثر تنش خشکی در کلزا گزارش شد (Moradshahi *et al*., 2004). توسعه و استفاده از ژنوتیپ‌های مقاوم به تنش خشکی می‌تواند در کاهش اثرات تنش خشکی کمک کند (Kim *et al*., 2019). در ایران پژوهش‌هایی روی کلزا در شرایط کم‌آبیاری و اثرات تنش‌های خشکی در شرایط محیطی و مکانی مختلف به‌منظور گسترش کشت و کار آن انجام شده است (Naghavi *et al*., 2015; Aghdam *et al*., 2019). انتخاب ارقام متحمل در برابر تنش خشکی می‌تواند باعث افزایش سطح زیر کشت کلزا در ایران و کشورهای مشابه از لحاظ اقلیمی شود (Nasiri *et al*., 2017). اثر قطع آبیاری در مراحل رشد رویشی و زایشی نشان داد صفات عملکرد دانه، وزن هزاردانه، درصد روغن و پروتئین دانه با کاهش همراه بودند، با این‌حال، در بین ارقام کلزا، رقم زرفام نسبت به اورنیت و لیکورد از مقاومت بالاتری نسبت به تنش خشکی برخوردار بود (Amiri *et al*., 2012).

عناصر ریزمغذی نقش اساسی در تمایز سلولی، رشد و استحکام دیواره سلولی دارند و در اکثر موارد باعث مقاومت گیاهان به آفات و امراض می‌شوند. محلول‌پاشی گیاه مفیدتر از کاربرد خاکی مواد غذایی برای بهبود شرایط تغذیه‌ای گیاه است. سیلیکون دومین عنصر فراوان بعد از اکسیژن در خاک است (Olle, 2014; Khorasaninejad *et al*., 2020). سیلیکون از فراوان‌ترین عناصر معدنی در بافت گیاهی است (Kim *et al*., 2012) و رسوب زیاد آن باعث افزایش استحکام بافت‌ها می‌شود (Neethirajan *et al*., 2009). این عنصر به‌عنوان عنصر ضروری برای اکثر گیاهان شناخته نشده است، اما اثرات مثبت بر رشد، نمو و عملکرد گیاهان زراعی دارد و کاهش‌دهنده تأثیر تنش خشکی است (Etesamia & Jeong, 2018; Khorasaninejad *et al*., 2020). در مطالعات متعددی گزارش شده است که کاربرد سیلیکون برای محصولات زراعی، تحمل آن‌ها را در برابر خشکی بهبود می‌بخشد (Amin *et al*., 2018). این ریزمغذی با

1. Relative leaf water content
2. Reactive oxygen species

تغییر در تبادل گازی برگ، سنتز املاح سازگار، تنظیم اسمزی منجر به کاهش اثرات تنش خشکی می‌شود (Pang *et al*., 2019). اثر محلول‌پاشی این ریزمغذی در شرایط تنش خشکی بر کلزا (Payandeh *et al*., 2018) و گلرنگ (Khorasaninejad *et al*., 2020) منجر به کاهش آسیب تنش شد.

این پژوهش به‌منظور بررسی تأثیر محلول‌پاشی سیلیکون بر صفات زراعی ارقام و لاین‌های امیدبخش بهاره کلزا در شرایط خشکی آخر فصل جهت توسعه کشت کلزا در مناطق معتدل و نیمه‌خشک کشور اجرا شد، تا بتوان لاین یا رقمی را معرفی کرد که در شرایط تنش خشکی و از طریق محلول‌پاشی سیلیکون، عملکرد اقتصادی قابل‌قبولی تولید نماید و تحمل به تنش بالاتری داشته باشد.

۲. مواد و روش‌ها

در این پژوهش به‌منظور ارزیابی پاسخ ژنوتیپ‌های بهاره کلزا به محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم در تنش خشکی آخر فصل، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار به‌مدت دو سال زراعی (۹۶-۹۵ و ۹۷-۹۶) در مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج با موقعیت طول جغرافیایی ۵۶′ و ۵۰° شرقی و عرض جغرافیایی ۴۷′ و ۳۵° شمالی و ارتفاع ۱۱۶۰ متر از سطح دریا اجرا شد. این منطقه براساس آمار آب‌وهوایی و منحنی آمبروترمیک به‌دلیل داشتن ۱۵۰ تا ۱۸۰ روز خشک، جزو مناطق آب‌وهوایی مدیترانه‌ای گرم و خشک و با داشتن زمستان سرد و مرطوب و تابستان گرم و خشک جزو رژیم رطوبتی خشک محسوب می‌شود. براساس میانگین داده‌های سی ساله هواشناسی کرج، متوسط بارندگی سالیانه منطقه ۲۴۳ میلی‌متر بود و بارندگی‌ها به‌طور عمده در اواخر پاییز و اوایل بهار انجام شده است. آمار هواشناسی محل آزمایش در طی دو سال زراعی در جدول (۱) ارائه شده است. بافت خاک مزرعه آزمایش، لومی بود و مشخصات خاک محل آزمایش در جدول (۲) ارائه شده است.

در این آزمایش عامل آبیاری در دو سطح آبیاری معمول (شاهد) و قطع آبیاری از مرحله خورجین‌دهی به بعد (سیستم کدبندی BBCH کد شماره ۷۵) و عامل محلول‌پاشی در دو سطح (محلول‌پاشی با چهار گرم در لیتر سیلیکات‌پتاسیم و عدم محلول‌پاشی) به‌صورت فاکتوریل در کرت‌های اصلی و ژنوتیپ‌های بهاره کلزا شامل DALGAN، RGS003، RGS×OKAPI، RGS×SLM و OG×AL در کرت‌های فرعی قرارگرفتند (رقم DALGAN به‌عنوان رقم شاهد در نظر گرفته شد).

جدول ۱. میانگین ماهانه بارش (میلی‌متر) و دما (سانتی‌گراد) در طول فصل رشد (۹۷-۹۵)

ماه	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد
سال	۱۳۹۵	۱۳۹۵	۱۳۹۵	۱۳۹۵	۱۳۹۵	۱۳۹۵	۱۳۹۶	۱۳۹۶	۱۳۹۶
بارش (mm)	۱۸/۸۵	۱۶/۵۸	۸/۱۳	٤/٦٧	۳/٦٧	۲/٥٤	۲۰/۲۷	۱۲/۱۱	۲۱/۹٤
میانگین دما (°C)	۱٦/۸	۹/۳	٥/۹	٥/۲	۷/۱	٦/٤	۱۳/۳	۲۱/۲	۲٦/۱
ماه	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد
سال	۱۳۹٦	۱۳۹٦	۱۳۹٦	۱۳۹٦	۱۳۹٦	۱۳۹۷	۱۳۹۷	۱۳۹۷	۱۳۹۷
بارش (mm)	۲۲/۸٥	۳۸/٤	۲٤/٦	۱۰/٦	۷/۷	۱٦/۸	٥۲/٥	۱٥/۳	۰
میانگین دما (°C)	۱۸/٤	۱۰/٥	٤/٦	٥/۱	٥/۱	۱۰/۸	۱۱/۷	۱۹/۹	۲۳/٤

جدول ۲. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش در عمق های ۳۰-۰ و ۶۰-۳۰ سانتی‌متر در طول فصل رشد (۹۷-۹۵)

عمق نمونه‌برداری (cm)	واکنش گل اشباع	هدایت الکتریکی خاک ($dS.m^{-1}$)	کربن آلی (%)	فسفر قابل جذب (mg/kg)	پتاسیم قابل جذب (mg/kg)	آهن قابل جذب (mg/kg)	نیتروژن کل (%)
۳۰-۰	۷/۱	۲/۰۵	۰/۴۶	۱۲/۶	۱۹۸	۳/۸۲	۰/۰۹
۶۰-۳۰	۷/۵	۱/۱۳	۰/۴۶	۱۴/۷	۱۶۴	۴/۹۰	۰/۰۹

عمق نمونه‌برداری (cm)	منگنز قابل جذب (mg/kg)	روی قابل جذب (mg/kg)	مس قابل جذب (mg/kg)	رس (%)	سیلت (%)	شن (%)	بافت خاک
۳۰-۰	۴/۰۲	۰/۵	۰/۶	۲۴	۳۶	۴۰	لومی
۶۰-۳۰	۳/۳۴	۱	۰/۷	۲۷	۳۴	۳۹	لومی

کاشت در تاریخ ۱۵ مهرماه صورت گرفت. براساس نتایج تجزیه خاک جدول (۲)، اقدام به کودپاشی، حدود یک سوم کود نیتروژن‌دار (۱۵۰ کیلوگرم در هکتار) و تمامی کود فسفات موردنیاز (کود فسفات از منبع سوپرفسفات‌تریپل براساس آزمون خاک انجام شده به میزان ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار) شد. جهت استفاده بهینه از نیتروژن، بقیه کود نیتروژن‌دار موردنیاز (۲۰۰ کیلوگرم در هکتار) به‌صورت سرک در مرحله شروع ساقه‌رفتن و ظهور اولین غنچه‌های گل مصرف شد. تراکم نهایی در هر مترمربع ۶۷ بوته بود. دور آبیاری براساس ۸۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A در نظر گرفته شد و مقدار آب مصرفی در هر بار آبیاری ۸۰ درصد آب تبخیر شده بود. میزان آب ورودی به مزرعه آزمایش با کنتور اندازه‌گیری شد. تعداد دفعات آبیاری در تیمارهای شاهد و قطع آبیاری از مرحله خورجین‌دهی به بعد به‌ترتیب هشت و شش مرتبه بود. هم‌چنین، میزان آب مصرفی در تیمارهای مذکور به‌ترتیب برابر با ۵۱۲۰ و ۳۸۴۰ مترمکعب در هکتار بود. محلول‌پاشی برگ توسط سیلیکات‌پتاسیم در مرحله روزت طی دو مرحله با فاصله ۱۰ روز و به میزان چهار گرم در لیتر از منبع سیلیکات‌پتاسیم به‌وسیله دستگاه سم‌پاش دستی انجام شد. برای تیمارهای شاهد نیز همان حجم آب بدون سیلیکات پتاسیم توسط سم‌پاش روی برگ‌ها آب‌پاشی شد. برای این منظور پس از کالیبراسیون دستگاه سم‌پاش با توجه به مساحت زمین و پس از محاسبه میزان محلول موردنیاز، محلول‌پاشی روی سطح گیاه انجام شد. هر کرت آزمایشی شامل شش خط شش متری با فاصله خطوط ۳۰ سانتی‌متر و فاصله بوته روی خط چهار سانتی‌متر بود که دو خط کناری به‌عنوان حاشیه در نظر گرفته شد. به‌منظور کنترل علف‌های هرز، از علف‌کش ترفلان به میزان ۲/۵ لیتر در هکتار به‌طور یکنواخت در سطح مزرعه استفاده شد و به‌وسیله دیسک سبک، کود و علف‌کش با خاک مخلوط شد. پس از عملیات کاشت مطابق نقشه آزمایش و سبزشدن و استقرار گیاهچه، عملیات داشت شامل کنترل احتمالی آفات به‌ویژه شته مومی با استفاده از سموم متاسیستوکس (۱/۵ لیتر در هکتار) و اکتاین (۱ لیتر در هکتار) صورت گرفت. به‌منظور تعیین صفاتی مانند ارتفاع بوته تعداد ۱۰ بوته از هر کرت آزمایشی با نزدیک‌شدن گیاه به زمان رسیدگی فیزیولوژیک به‌صورت تصادفی انتخاب شد و این صفات در آن‌ها اندازه‌گیری شد. برای

اندازه‌گیری عملکرد دانه، پس از کف‌برنمودن بوته‌های هر کرت آزمایشی بعد از جداکردن دانه از خورجین عملکرد دانه محاسبه شد. برای اندازه‌گیری درصد روغن دانه از هر کرت آزمایشی حدود سه گرم بذر تهیه شد که با دستگاه اسپکترومتر NMR (mq20، Bruker، Germany) برحسب درصد اندازه‌گیری شد. با قراردادن سه گرم نمونه آسیاب‌شده در میدان مغناطیسی خارجی، سطوح انرژی پروتون‌های موجود در نمونه که در خارج از میدان هم عرض بودند، از یکدیگر تفکیک شده و با جذب انرژی ارسال‌شده توسط امواج رادیویی، پروتون‌های سطوح پایین به سطوح بالا برانگیخته می‌شوند. میزان جذب انرژی رادیویی موردسنجش قرار گرفت و به میزان روغن دانه ارتباط داده شد. از حاصل‌ضرب درصد روغن در عملکرد دانه در هکتار، عملکرد روغن در هکتار محاسبه شد. درصد محتوای نسبی آب برگ با رابطه (۱) محاسبه خواهد شد (Rodriguez *et al*.,2002).

$$RWC = (FW- DW) / (TW- DW) \times 100 \qquad (۱)$$

که در آن، RWC محتوای نسبی آب برگ، FW وزن‌تر برگ، TW وزن برگ‌آماس‌شده، DW وزن‌خشک‌برگ می‌باشد. هم‌چنین جهت بررسی دیگر صفات فیزیولوژیک، بعد از قطع آبیاری در مرحله خورجین‌دهی اقدام به نمونه‌گیری برگی شد و نمونه‌ها بلافاصله به آزمایشگاه منتقل و در نیتروژن مایع فریز شد. برای نگهداری نمونه‌ها تا زمان انجام تجزیه‌های بیوشیمیایی در فریزر ۸۰- درجه سلسیوس نگهداری شد. برای سنجش مقدار کلروفیل، برگ‌ها در استون ۸۰ درصد ساییده شدند .پس از صاف‌کردن به‌وسیله کاغذ صافی جذب آن‌ها در طول موج‌های ٦٤٥ و ٦٦٣ نانومتر خوانده شد. جهت صفرکردن دستگاه از استون ۸۰ درصد استفاده شد. نتایج برحسب میلی‌گرم بر گرم وزن تر محاسبه و ارائه شده است (Arnon, 1949). جهت اندازه‌گیری کربوهیدرات‌های محلول برگ نمونه‌های منجمد به میزان ۰/۲ گرم در سه میلی‌لیتر آب مقطر عصاره‌گیری شدند و سپس محلول همگن حاصل به‌کمک کاغذ صافی، صاف شد. برای اندازه‌گیری قند نمونه، به ۵۰ میکرولیتر از همگن صاف‌شده ۰/۵ میلی‌لیتر فنل پنج درصد و ۲/۵ میلی‌لیتر سولفوریک اسید ۹۸ درصد اضافه شد. منحنی استاندارد با استفاده از غلظت‌های مختلف گلوکز از ۸-۰ میلی‌گرم در میلی‌لیتر ترسیم شد. جذب استانداردها به‌همراه جذب قند نمونه‌ها با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر (Varian Cary Win UV 6000i، Australia) طول موج ٤٩٠ نانومتر اندازه‌گیری شد و مقدار قند نمونه، برمبنای وزن‌تر نمونه بیان شد (Dubois *et al*., 1965). مقدار پرولین نیز در طول موج ۵۲۰ نانومتر در دستگاه اسپکتروفوتومتر اندازه‌گیری شد (Bates *et al*., 1973). از پروموتر (DELTA-T DEVICES، Cambridge) برای اندازه‌گیری مقاومت روزنه‌ای استفاده شد.

در پایان پس از اطمینان از مفروضات آزمایشی و بعد از انجام آزمون بارتلت (جدول ٤) و اثبات همگن‌بودن واریانس‌های آزمایشی با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS (نسخه ۹/۱) تجزیه واریانس مرکب شدند. برای مقایسه میانگین اثرات متقابل از رویه برش‌دهی و برای رسم نمودارها و جدول‌ها از نرم‌افزار Excel استفاده شد.

۳. نتایج و بحث

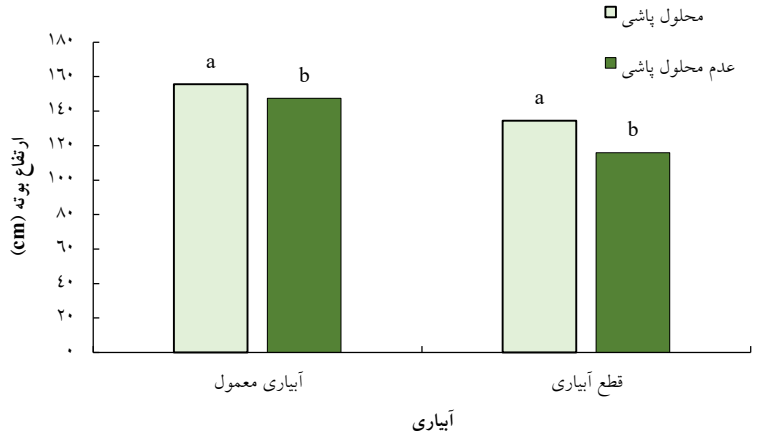
۳. ۱. ارتفاع بوته

نتایج تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که اثر ساده سال، آبیاری، ژنوتیپ و هم‌چنین اثر متقابل آبیاری× محلول‌پاشی در سطح یک درصد و اثر متقابل آبیاری× ژنوتیپ در سطح پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). ارتفاع بوته در سال دوم نسبت به سال اول ۹ درصد افزایش داشت (جدول ۵). به‌نظر می‌رسد بارندگی بیش‌تر در سال دوم آزمایش به‌دلیل کاهش تنش‌های محیطی و

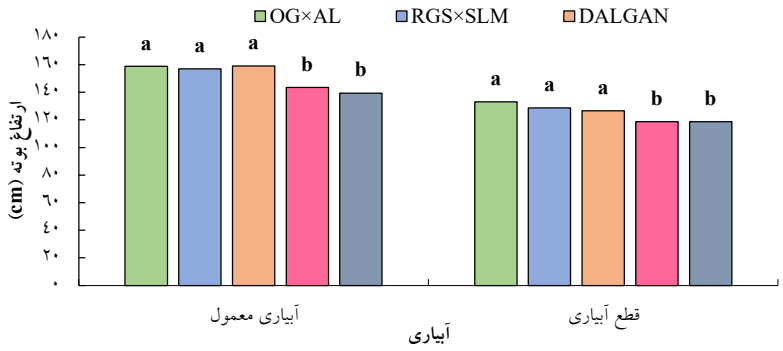
هم‌چنین عدم محدودیت رشد، باعث افزایش ارتفاع بوته شده است. مقایسه میانگین برهم‌کنش دوگانه آبیاری و محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم بر ارتفاع بوته نشان داد که بیش‌ترین ارتفاع مربوط به تیمار آبیاری معمول و محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم با میانگین ۱۵۵/۶۲ سانتی‌متر بود، به‌طوری‌که نسبت به تیمار شاهد پنج درصد بیش‌تر بود. در شرایط تنش تحت تأثیر سیلیکات‌پتاسیم ارتفاع بوته ۱۳٤/٤۷ سانتی‌متر شد که نسبت به شرایط عدم محلول‌پاشی ۱٤ درصد افزایش داشت (شکل ۱). سیلیکات‌پتاسیم اثرات تنش خشکی را از طریق بهبود توانایی برگ در جذب نور و ظرفیت فتوسنتزی (Gong *et al*., 2003)، با افزایش میزان کلروفیل در برگ کاهش می‌دهد و سبب افزایش رشد و در نهایت ارتفاع گیاه می‌شود (Gao *et al*., 2004). افزایش ارتفاع بوته در شرایط تنش خشکی تحت تأثیر سیلیکات‌پتاسیم توسط بسیاری از پژوهش‌گران دیگر نیز گزارش شده است که با نتایج این آزمایش هم‌خوانی دارد (Gong *et al*., 2003; Pulz *et al*., 2008; Bakhat *et al*., 2009; Lee *et al*., 2010; Amiri *et al*., 2012; Kim *et al*., 2012).

در بین ژنوتیپ‌های موردبررسی تفاوت معنی‌داری از نظر ارتفاع بوته در سطوح آبیاری وجود داشت، به‌طوری‌که در شرایط آبیاری معمول، رقم DALGAN و ژنوتیپ‌های OG×AL و RGS×SLM به‌ترتیب با میانگین ۱۵۹/۱۵، ۱۵۸/۷۵ و ۱۵٦/۹۵ سانتی‌متر و در شرایط قطع آبیاری از مرحله خورجین‌دهی به بعد ژنوتیپ‌های OG×AL، RGS×SLM و رقم DALGAN به‌ترتیب با میانگین ۱۳۳/۱٦، ۱۲۸/۷۵ و ۱۲٦/٦۵ سانتی‌متر بیش‌ترین ارتفاع را به‌خود اختصاص دادند (شکل ۲).

پژوهش‌گران دیگر نیز تفاوت بین ارقام و گونه‌های کلزا را در صفت ارتفاع بوته گزارش داده‌اند (Iqbal *et al*., 2008). داشتن بیش‌ترین گل و خورجین در گل‌آذین ساقه مشخص‌کننده محور گل‌آذین بلندتر است. در مرحله پرشدن خورجین‌ها با ریزش برگ‌ها می‌توان گفت فتوسنتز فقط از طریق خورجین و ساقه صورت‌می‌گیرد و هرچه ارتفاع بوته بلندتر باشد سطح فتوسنتزی و تولید مواد متابولیکی بیش‌تر خواهد بود (Norton *et al*., 1991). می‌توان گفت برتری عملکرد این سه ژنوتیپ را با این صفت در ارتباط دانست.



شکل ۱. برهم‌کنش سطوح آبیاری× محلول‌پاشی بر صفت ارتفاع بوته به‌روش برش‌دهی.
میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون براساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.



شکل۲. برهم‌کنش سطوح آبیاری× ژنوتیپ بر صفت ارتفاع بوته به‌روش برش‌دهی.

میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون براساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

۳. ۲. عملکرد دانه

نتایج تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که اثر سه‌گانه آبیاری× محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم× ژنوتیپ نیز بر این صفت معنی‌دار بود (جدول ۳). عملکرد دانه در سال دوم ۱۷ درصد بیش‌تر از سال اول بود (جدول ۵). بالاترین میزان عملکرد دانه در آبیاری معمول، بدون محلول‌پاشی به ژنوتیپ OG×AL با عملکرد دانه ۵۰۸۷ کیلوگرم در هکتار و در تیمار محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم به ژنوتیپ OG×AL با عملکرد دانه ۵٦۲۰ کیلوگرم در هکتار تعلق داشت که ۹/٤ درصد افزایش داشت (جدول ۵). در شرایط قطع آبیاری بعد از خورجین‌دهی در شرایط بدون محلول‌پاشی ژنوتیپ‌های OG×AL، RGS×SLM و DALGAN به‌ترتیب با عملکرد دانه ۳۵۰٦، ۳٤٦٤ و ۳۳۸۸ کیلوگرم در هکتار و در تیمار کاربرد محلول سیلیکات‌پتاسیم ژنوتیپ‌های RGS×SLM و DALGAN به‌ترتیب با ٤۱۲٤ و ٤۰۱۷ کیلوگرم در هکتار بالاترین عملکرد دانه را داشتند که به‌ترتیب ۱٦ و ۱۵/٦۵ درصد افزایش عملکرد نسبت به شرایط قطع آبیاری بعد از خورجین‌دهی در شرایط بدون محلول‌پاشی را نشان داد (جدول ٦).

نتایج مشابه در پژوهش‌های صورت‌گرفته حاکی از تأثیر مثبت سیلیکات‌پتاسیم بر رشد و عملکرد دانه در گونه‌های مختلف می‌باشد (Amin *et al*., 2018; 2014; Artyszak & Kucinska., 2016; Gugała *et al*., 2017). سیلیکون با سرعت‌بخشیدن به رشد رویشی و افزایش تولید ماده خشک و کاهش تعرق باعث افزایش کیفیت دانه و در نهایت عملکرد اقتصادی می‌شود (Agarie *et al*., 1993). هم‌چنین سیلیکون روی گیاهان زراعی منجر به افزایش تحمل به خشکی (Gong *et al*., 2008) و عملکرد (Epstein, 2001) می‌شود.

۳. ۳. محتوای نسبی آب برگ

نتایج تجزیه مرکب داده‌ها نشان داد که اثر سه‌گانه برهم‌کنش آبیاری× محلول‌پاشی× ژنوتیپ بر محتوای نسبی آب برگ در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول۳). برهم‌کنش سه‌گانه آبیاری در محلول‌پاشی در ژنوتیپ نشان داد، در شرایط آبیاری کامل و محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم، ژنوتیپ OG×AL بالاترین درصد محتوی نسبی آب برگ را دارد (۹۷/۹۳ درصد)، با این‌حال، تفاوت معنی‌داری با رقم RGS×OKAPI در سطح محلول‌پاشی و آبیاری کامل نداشت. هم‌چنین ژنوتیپ‌های RGS×SLM و DALGAN در سطح قطع

آبیاری و محلول‌پاشی تفاوت معنی‌داری نداشتند، چرا که محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم با افزایش تحمل به خشکی در گیاه، موجب افزایش محتوای نسبی برگ می‌شود. بررسی‌ها نشان داد کم‌ترین محتوای نسبی آب برگ نیز با ۸۲/۰۵ درصد در ژنوتیپ RGS×OKAPI در شرایط محلول‌پاشی و قطع آبیاری به‌دست آمد (جدول ٦).

محتوای نسبی آب گیاه یکی از صفات مهم در رابطه با وضعیت آب در خاک است. افزایش تنش خشکی با کاهش مقدار آب قابل دسترس و جذب‌شده، موجب کاهش محتوای نسبی آب برگ می‌شود (Heidari *et al*., 2015). تنش خشکی می‌تواند محتوای نسبی آب برگ ارقام کلزا را به‌طور معنی‌داری کاهش دهد، هرچند این کاهش میان ارقام متفاوت می‌باشد (Moradi Aghdam *et al*., 2018). بسته‌شدن روزنه نوعی پاسخ اولیه به تنش خشکی در خاک بوده که با تنظیم روزنه از اتلاف زیاد آب از طریق تعرق جلوگیری می‌شود.

۳. ٤. مقاومت روزنه‌ای برگ

نتایج تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که اثر سه‌گانه آبیاری× محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم× ژنوتیپ نیز بر این صفت معنی‌دار بود (جدول ۳). مقاومت روزنه‌ای برگ در سال دوم ۱۱ درصد کم‌تر از سال اول بود (جدول ۵). مقایسه میانگین سه‌گانه آبیاری در محلول‌پاشی در ژنوتیپ که نشان داد بالاترین مقاومت روزنه‌ای با ۲۹/۳٤ ثانیه بر سانتی‌متر در ژنوتیپ RGS×SLM بود، که در شرایط قطع آبیاری و محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم به‌دست آمد، که حاکی از آن است که در شرایط خشکی و هم‌چنین محلول‌پاشی برگ‌ها با بسته‌ترکردن روزنه‌های خود، نسبت به خشکی خود را مقاوم می‌کنند. کم‌ترین مقدار مقاومت روزنه‌ای نیز با ۱۵/۲۸ ثانیه بر سانتی‌متر در ژنوتیپ DALGAN در آبیاری کامل به‌همراه محلول‌پاشی به‌دست آمد، که طبیعتاً نشان از عدم وجود تنش دارد (جدول ٦).

به‌طورکلی در شرایط تنش خشکی، محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم می‌تواند به بسته‌ترشدن روزنه‌ها در جهت کاهش تعرق و ازدست‌دادن آب برگ کمک کند، که این عمل یک راه‌کار جهت تحمل به شرایط خشکی می‌باشد. در این شرایط ژنوتیپ RGS×SLM از توانایی بالاتری برخوردار بود. تنش خشکی بر ارقام کلزا باعث افزایش مقاومت روزنه‌ای آن‌ها می‌شود (Moradi Aghdam *et al*., 2018) و با بسته‌شدن روزنه‌ها و در نتیجه کاهش دسترسی به CO_2 در مزوفیل منجر به کاهش فتوسنتز گیاه می‌گردد (Heidari *et al*., 2015).

۳. ۵. پرولین برگ

جدول تجزیه واریانس نشان داد که اثر سه‌گانه آبیاری× محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم× ژنوتیپ و اثر سه‌گانه سال× آبیاری× ژنوتیپ قرار گرفت (جدول ۳). پرولین برگ در سال دوم ۲٦ درصد کم‌تر از سال اول بود (جدول ۵). میزان پرولین برگ در برهم‌کنش سه‌گانه آبیاری در محلول‌پاشی در ژنوتیپ نیز نشان داد بالاترین میزان پرولین (۲۳/۳۳ میکرومول در گرم وزن تر) که نشان‌گر تحمل بیش‌تر به خشکی می‌باشد در ژنوتیپ RGS×OKAPI در شرایط قطع آبیاری و بدون محلول‌پاشی به‌دست آمد، کم‌ترین مقدار نیز در شرایط آبیاری کامل و محلول‌پاشی به‌دست آمد (جدول ٦). به‌طورکلی، محلول‌پاشی در جهت بهبود تنش عمل می‌کند، درحالی‌که در شرایط تنش خشکی و قطع آبیاری میزان پرولین افزایش می‌یابد و براساس نتایج میزان پرولین برگ در شرایط آبیاری کامل نسبت به قطع آبیاری در کلیه ژنوتیپ ها کم‌تر بود (جدول میزان پرولین برگ در برهم‌کنش سال× آبیاری× ژنوتیپ نیز نشان داد که در

سال اول کشت، بیش‌ترین میزان پرولین (۲۰/٤۰ میکرومول در گرم وزن تر) در ژنوتیپ RGS003 در شرایط آبیاری معمول و در شرایط قطع آبیاری نیز همان ژنوتیپ (۲٤/٤۷ میکرومول در گرم وزن تر) بیش‌ترین میزان پرولین را داشت و کم‌ترین میزان به ژنوتیپ OG×ALدر هر دو تیمار تعلق گرفت. در سال دوم کشت، بیش‌ترین میزان پرولین به ژنوتیپ RGS×OKAPI با میانگین (۱٤/۹۸ میکرومول در گرم وزن تر) در شرایط آبیاری معمول و در شرایط قطع آبیاری ژنوتیپ‌های RGS003 و RGS×OKAPI بیش‌ترین میزان را داشتند و کم‌ترین میزان به ژنوتیپ OG×AL در هر دو تیمار تعلق گرفت (جدول ۷).

جدول ۳. نتایج تجزیه مرکب برخی صفات مورد بررسی کلزا

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات						
		ارتفاع گیاه	عملکرد دانه	محتوای نسبی آب برگ	مقاومت روزنه‌ای	پرولین	کربوهیدرات محلول برگ	کلروفیل کل
سال	۱	۵۰۰٦/۵۰**	۱۸۷۱۱۷۹۱/۵۸**	۰/۱٦ns	۱۷٤/۰۲**	۸۷۷/۵**	۵۳۷/۵۵**	۰/۵۲ns
سال (تکرار)	٤	۷۳/٤۰	۳۲۷۵۰٤/٤۲	۸/۱۱۷	۵/۰۹	٤/۳۰	۱۸/۹۵	۰/۰۷٤
آبیاری	۱	۲۰۸۱٦/۵۰**	۵۸۰۷٤۱۸۳/۷۷**	۲۱٤/۷۲**	۱۲۰۵/۹۳**	٦۷۷/۹۲**	۲۷٦۵/۵٦**	٤/۸۹**
سال× آبیاری	۱	٦/۵۸ns	۲۰۵٦٦٤/٤٤ns	٦/۱۲ns	۱۵/۱۹ns	۲/۱٤ns	۰/٤۰ns	۰/۰۲ns
سیلیکات پتاسیم	۱	۵۳٦۱/۳۷**	۳٤۳۲۹٤۳/۲٤**	۳/۲٤ns	۱۷/۲٦*	٤٦/۸۷**	۸۱۱/۲**	۰/۲٦**
سال× سیلیکات پتاسیم	۱	٤۹/۵٤ns	۳۳/٦٦ns	۰/۳۱٦ns	۰/۱۸ns	۰/۰٦ns	۰/۲۱ns	۰/۰۰۰۱ns
آبیاری× سیلیکات پتاسیم	۱	۸۱۰/٦۸**	۵٦۸۹/۹ns	۲/٤۵ns	۸/۹۲ns	۰/۲٦ns	۲۱۷/۵٦**	۰/۰۰۱۸ns
سال× آبیاری× سیلیکات پتاسیم	۱	۱۳/۲۷ns	۰/۲۹ns	۰/۰۰۹ns	۰/۰۰۳ns	۲/۹۵ns	۰/۹۰ns	۰/۰۰٤۳ns
خطای (الف)	۱۲	۵۸/۸۵	۲۱۵۸۱۱/٤۸	۷/۱۳۸	۳/۵۲۳	۱/۹۱	۸/٤۰	۰/۰۲۵
ژنوتیپ	٤	۱٤۳۲/۷۰**	٤۱۷۵۳۰۱/٤٤**	۲٤/٤۷**	۷٤/٦٤**	٤۵/۳۹**	۲٤۲/۸٦**	۰/۰٤۲**
سال× ژنوتیپ	٤	۰/۱۹ns	٤۷۵٦/٤٦ns	۰/۳۸ns	۰/۰٤۳ns	۰/۳۵ns	۰/۲۱ns	۰/۰۰۰۲ns
آبیاری× ژنوتیپ	٤	۱۱۳/۹۲*	۹۲۳٦۰۷/٦٤**	۱٦۸/۵۵**	۳۲/۹٦**	۷/٤۲**	۱/۹۰ns	۰/۰٤۲**
سال× آبیاری× ژنوتیپ	٤	۳/٤۸ns	۳۷۱۷/۸ns	۰/۰۰۳ns	۱/۰۵۷ns	۳/۲۲*	۰/٤ns	۰/۰۰۸ns
سیلیکات پتاسیم× ژنوتیپ	٤	۱۷/۳۵ ns	۷۰۳۹/۹۷ns	٦/۱٦ns	۲/۰۹ns	۰/۹۵ns	۰/۳۱ns	۰/۰۰۰۹ns
سال× سیلیکات پتاسیم× ژنوتیپ	٤	۵/٤۷ ns	٤۲٤۲/٤۵ns	۰/۰۰٦ns	۰/۰۲ns	۰/۱ns	۰/۵۵ns	۰/۰۰۰۳ns
آبیاری× سیلیکات پتاسیم× ژنوتیپ	٤	۸/۸۰ns	٤۲۵۰٤۵/۵۸*	۱۷۸/۱۸**	۱۰/۵۰**	۸/٤۷**	۰/۲۷ns	۰/۰۳۷**
سال× آبیاری× سیلیکات پتاسیم× ژنوتیپ	٤	۷/۰۲ ns	۱۹۲۵/۱ns	۰/۰۲۳ns	۰/۰۸۳ns	۰/۱۰۲ns	۰/۳۸ns	۰/۰۰۲۸ns
خطای (ب)	٦٤	٤۵/۱۲	۱٤۸۳۲۵/۲	٦/۰۷	۰/۱٤	۱/۱۵	۵/٤	۰/۰۰۸۷
ضریب تغییرات (٪)		٤/۸۵	۹/۵۹	۲/٦۸	٤/۹٦	۵/۸٤	٦/۰٤	۷/۳۲

*** ، ** و ns به‌ترتیب معنی داری در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد و عدم معنی دار.**

جدول ٤. نتایج آزمون بارتلت

صفات	ارتفاع گیاه	عملکرد دانه	محتوای نسبی آب برگ	مقاومت روزنه‌ای	پرولین	کربوهیدرات محلول برگ	کلروفیل کل
Chi-quare	۱/۵۱	۲/۹۷	۰/۱۵	۰/۷۸	٦۰/۲۳	۲/۸	۲/۰٤
P Value	۰/۲۱	۰/۰۸	۰/٦	۰/۳۷	۸/٤۳	۰/۰۹۳	۰/۱۵

جدول ۵. مقایسه میانگین اثر ساده سال بر صفات موردبررسی در کلزا

سال	کربوهیدرات محلول برگ (mg.g.FW)	پرولین برگ (µmol/g.Fw)	مقاومت روزنه‌ای (S/cm)	عملکرد دانه (kg/ha)	ارتفاع بوته (cm)
سال اول	٤۰/۵۷ a	۲۱/۰۹ a	۲۲/۷٤ a	۳٦۱۷ b	۱۳۱/۹۰b
سال دوم	۳٦/۳٤ b	۱۵/٦۹ b	۲۰/۳۳ b	٤٤۰٦ a	۱٤٤/۸۲ a

جدول ٦. مقایسه میانگین برهم‌کنش سه گانه آبیاری، محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم و ژنوتیپ بر صفات مورد بررسی در ژنوتیپ‌های کلزا به‌روش برش‌دهی در طول فصل رشد (۹۵-۹۷)

آبیاری	محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم	ژنوتیپ	عملکرد دانه (kg/ha)	محتوای نسبی آب برگ (%)	مقاومت روزنه‌ای (S/cm)	پرولین برگ (µmol/g.FW)	کلروفیل کل (mg/g.FW)
شاهد	عدم محلول‌پاشی	OG × AL	۵۰۸٦/۷ a	۹۳/٤۷ a	۱۸/۵۸ ab	۱۵/٤۰ a	۱/۵۳ a
		RGS × SLM	٤٦۸۱/۵ ab	۹۳/۰۳ a	۱۸/۰ abc	۱٦/۰۸ a	۱/٤۷ ab
		DALGAN	٤۷۲۵/۳ ab	۹۳/۳۰ a	۱۵/٦٤ c	۱۵/٦۲ a	۱/۵۱ a
		RGS 003	٤۱۷۹/۸ b	۹۱/۸٦ a	۱۹/٦۷ a	۱۷/۷۲ a	۱/۳۳ bc
		RGS × OKAPI	٤۰۵۳ b	۹۱/٦٦ a	۱٦/٦٤ bc	۱۸/۰۹ a	۱/۲۸ c
	LSD (0.05)		۷۵۲/۱۳	۲/۸۸	۲/٤٦	٤/۱۹	۰/۱۷
	محلول‌پاشی (٤گرم در لیتر)	OG × AL	۵٦۲۰/۳ a	۹۷/۹۳ a	۲۱/۱۱ a	۱٤/٦۲ ab	۱/۷۱ a
		RGS × SLM	٤۷۳۱/۸ b	۸۹/۱۲ c	۱۹/۱۹ ab	۱۳/۹۹ b	۱/۵۰ b
		DALGAN	٤۸۳۲/۲ b	۸۹/۵۷ c	۱۵/۲۷ c	۱۳/۷۰ b	۱/۵۲ b
		RGS 003	٤۵۲۷ b	۹۲/۵۲ b	۲۱/۱۹ a	۱٦/۷۸ ab	۱/٤۰ b
		RGS × OKAPI	٤٦۳۷/۵ b	۹۷/۲٦ a	۱۸/۳۲ b	۱۸/۰٦ a	۱/٤٤ b
	LSD (0.05)		۷٤۱/۷۳	۲/۱۵	۲/۵۳	۳/۸٦	۰/۱۳
قطع آبیاری از مرحله خورجین‌دهی به بعد	عدم محلول‌پاشی	OG × AL	۳۵۰٦/۵ a	۹۰/۸۵ a	۲۵/۲۷ ab	۱۹/۹۵ a	۱/۱٤ a
		RGS × SLM	۳٤٦٤/۳ a	۹۰/٦۷ a	۲۷/۲۷ a	۲۰/۳۳ a	۱/۱۰ a
		DALGAN	۳۳۸۸/۷ a	۹۰/٤۵ a	۲۲/٤۷ d	۲۰/۷٦ a	۱/۰۸ a
		RGS 003	۲۷۳۲/۸ b	۸۹/۷۸ a	۲٤/۷۲ bc	۲۲/۸۰ a	۰/۸۹ b
		RGS × OKAPI	۲٦۰۸/۵ b	۸۹/٦۳ a	۲۳/۲۵ cd	۲۳/۳۳ a	۰/۸٦ b
	LSD (0.05)		٦۰۲/۰۸	۲/۹۸	۱/۹۹	۳/٦٦	۰/۱٤
	محلول‌پاشی (٤گرم‌در لیتر)	OG × AL	۳۵۳۲ ab	۵۲۸۵ c	۲۳/۹٤ b	۱۷/۲۸ b	۱/۱۸ a
		RGS × SLM	٤۱۲٤/۲ a	۹۷/۰۱ a	۲۹/۳٤ a	۲۰/٤٤ ab	۱/۲۹ a
		DALGAN	٤۰۱۷/۸ a	۹٦/۸۱ a	۲٤/۲۹ b	۲۰/۸۳ ab	۱/۲٦ a
		RGS 003	۳۰۷۸/۵ bc	۹۰/۱۹ b	۲٤/۹۸ b	۲۱/۸۱ a	۰/۹۹ b
		RGS × OKAPI	۲۷۰۸/٦ c	۸۲/۰۵ d	۲۱/۵۱ c	۲۰/۰۸ ab	۰/۸۸ b
	LSD (0.05)		٦۱۹/۵۸	۲/۸۳	۱/۵۳	۳/۹۸	۰/۱٦

میانگین‌های هر ستون با حروف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار می‌باشند.

جدول ۷. مقایسه میانگین برهم‌کنش سه گانه سال، آبیاری و ژنوتیپ بر صفات مورد بررسی در ژنوتیپ‌های کلزا به‌روش برش‌دهی

سال	آبیاری	ژنوتیپ	پرولین برگ (µmol/g.FW)
سال ۹۵-۹۶	شاهد	OG × AL	۱۷/۶۰ b
		RGS × SLM	۱۷/۷۸ b
		DALGAN	۱۷/۲۷ b
		RGS 003	۲۰/۴۰ a
		RGS × OKAPI	۲۱/۱۷ a
	LSD (0.05)		۱/۳۲
	قطع آبیاری از مرحله خورجین‌دهی به بعد	OG × AL	۲۱/۴۵ b
		RGS × SLM	۲۳/۳۴ ab
		DALGAN	۲۳/۶۵ ab
		RGS 003	۲۴/۴۷ a
		RGS × OKAPI	۲۳/۶۵ ab
	LSD (0.05)		۲/۱۱
سال ۹۶-۹۷	شاهد	OG × AL	۱۲/۴۲ c
		RGS × SLM	۱۲/۲۹ c
		DALGAN	۱۲/۰۵ c
		RGS 003	۱۴/۰۹ b
		RGS × OKAPI	۱۴/۹۸ a
	LSD (0.05)		۰/۵۱
	قطع آبیاری از مرحله خورجین‌دهی به بعد	OG × AL	۱۵/۶۸ c
		RGS × SLM	۱۷/۴۳ b
		DALGAN	۱۷/۹۴ b
		RGS 003	۲۰/۱۳ a
		RGS × OKAPI	۱۹/۷۶ a
	LSD (0.05)		

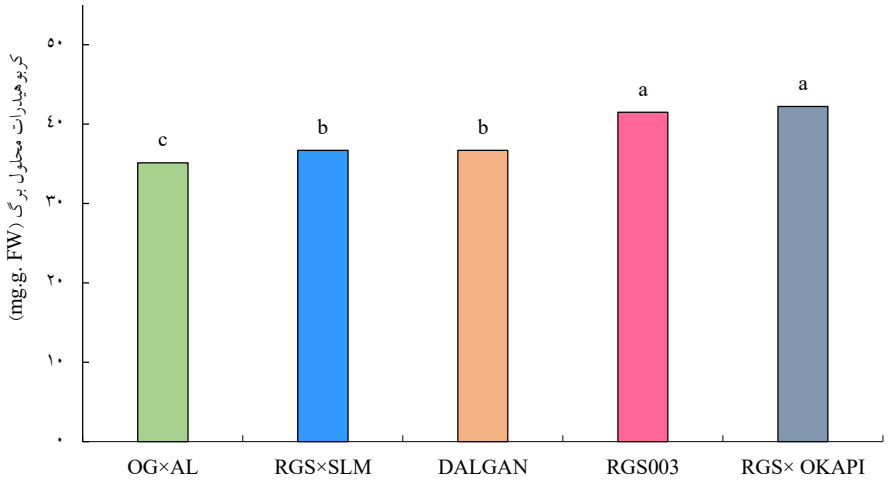
میانگین‌های هر ستون با حروف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار می‌باشند.

تجمع پرولین در شرایط تنش به‌واسطه سنتز پرولین و غیرفعال‌شدن تخریب انجام می‌شود. افزایش محتوای پرولین در شرایط تنش باعث محافظت غشای سلولی، پروتئین‌ها، آنزیم‌های سیتوپلاسمی و مهار گونه‌های فعال اکسیژن و حذف رادیکال‌های آزاد می‌شود (Boroujerdnia et al., 2016). افزایش میزان پرولین در مطالعات بسیاری تحت تنش خشکی گزارش شده است (Ghorbanli *et al*., 2013). میزان پرولین برگ در شرایط قطع آبیاری به‌دلیل نقش خود در تنظیم اسمزی افزایش می‌یابد، این امر موجب حفظ تورژسانس سلول‌ها می‌شود که نقش حفظ‌کننده گیاه در شرایط تنش خشکی را بر عهده دارد که میزان آن در ژنوتیپ‌های متحمل به تنش خشکی بیش‌تر می‌باشد (Mirzaee et al., 2012; Aranjuelo et al., 2011). در مطالعه حاضر ارقام برتر،

لزوماً مقدار پرولین زیادی نداشتند. البته مقادیر زیاد و یا کم پرولین نمی‌تواند یک معیار مقاومت و برتری در ژنوتیپ‌های مقاوم به خشکی باشد (Ebrahimiyan *et al*., 2012).

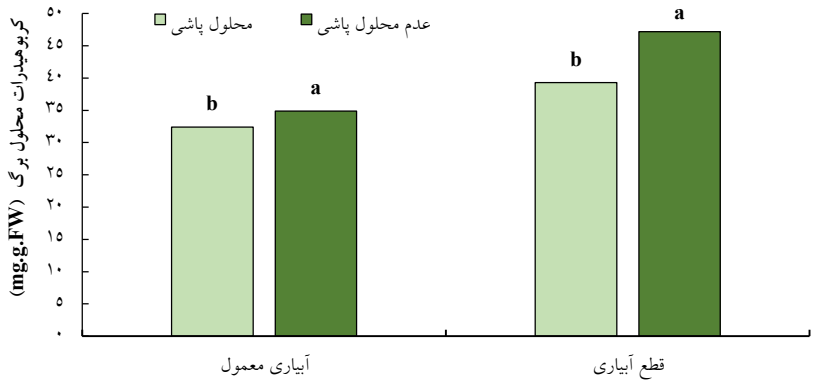
۳. ٦. کربوهیدارت محلول برگ

اثر سطوح سال، آبیاری، سیلیکات‌پتاسیم، ژنوتیپ و هم‌چنین اثر متقابل آبیاری× محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم در سطح یک درصد معنی‌دار بودند (جدول ۳). کربوهیدارت محلول برگ در سال دوم ۲۵ درصد کم‌تر از سال اول بود (جدول ۵). ژنوتیپ‌های مختلف کلزا به‌دلیل ماهیت ژنتیکی متفاوت واکنش متفاوتی نشان دادند، به‌طوری‌که بالاترین میزان کربوهیدارت محلول با ٤۲/۲۲ و ٤۱/٤۹ میلی‌گرم در گرم وزن تر در ژنوتیپ‌های RGS003 و RGS×OKAPI مشاهده شد، درحالی‌که کم‌ترین مقدار با ۳۵/۱٤ میلی‌گرم در گرم وزن تر در ژنوتیپ OG×AL بود (شکل ۳). نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری× محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم بر میزان کربوهیدرات محلول برگ نشان داد که قطع آبیاری از مرحله خورجین‌دهی به بعد و عدم محلول‌پاشی باعث افزایش میزان کربوهیدرات محلول برگ شد (شکل ٤). میزان قندهای محلول گلوکز، مانوز و رامنوز در بافت‌ها در رقم‌های مختلف متفاوت است (Mirzaee *et al*., 2012). افزایش مقدار کربوهیدرات محلول بر اثر تنش خشکی در کلزا (Kirkegaard *et al*., 2008)، کنجد (Aein, 2011)، کتان روغنی (Parida *et al*., 2008) و برنج (Pirdashti *et al*., 2009) نیز گزارش شده است. به عقیده برخی پژوهش‌گران در طول دوره تنش، قندها به‌عنوان یکی از مکانیسم‌های مقاومت عمل می‌کنند (Bai *et al*., 2013). قندهای محلول نقش مهمی در تنظیم اسمزی سلول‌ها دارند و برخی گیاهان مانند کلزا از طریق تجمع مقدار زیادی مواد محافظت‌کننده اسمزی مانند قندهای محلول می‌توانند به‌طور چشمگیری نسبت به تنش‌های دمای بالا و خشکی مقاومت نمایند و ظرفیت پایین در تجمع محافظت‌کننده‌های اسمزی مانند قندها یکی از دلایل ضعف گیاهان در شرایط تنش عنوان شده است (Bai *et al*., 2013).



شکل ۳. مقایسه میانگین اثر ساده ژنوتیپ بر کربوهیدارت محلول برگ.

میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون براساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.



شکل ٤. برهم‌کنش سطوح آبیاری در محلول‌پاشی بر صفت کربوهیدارت محلول برگ به‌روش برش‌دهی. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون براساس آزمون LSD در سطح ٥ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

علاوه بر این، سیلیکون در شرایط تنش خشکی اثرات بسیاری در گیاهان دارد، اما متأسفانه مطالعات محدودی در این زمینه صورت گرفته است. به‌عنوان مثال، کاربرد سیلیکات‌پتاسیم باعث افزایش لیگنین، سلولز، پکتین، کربوهیدرات محلول برگ در شرایط خشکی در یک آزمایش شد (Emam *et al*., 2014)، که با نتایج آزمایش ما مطابقت دارد.

٣. ٧. کلروفیل کل برگ

میزان کلروفیل کل برگ تحت تأثیر اثر سه‌گانه آبیاری× محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم× ژنوتیپ قرار گرفت (جدول ٣). بالاترین میزان کلروفیل کل با ١/٧٢ میلی‌گرم در گرم وزن تر در ژنوتیپ OG×AL در شرایط آبیاری کامل به‌همراه محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم به‌دست آمد، درحالی‌که کم‌ترین مقدار آن با ٠/٨٧ میلی‌گرم در گرم وزن‌تر در ژنوتیپ RGS×OKAPI و قطع آبیاری مشاهده شد (جدول ٦). محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم در شرایط آبیاری کامل توانست مقدار کلروفیل برگ را افزایش دهد، درحالی‌که در شرایط قطع آبیاری افزایش کلروفیل برگ غیر معنی‌دار بود. کلروفیل به‌عنوان یک معیار می‌تواند برای سنجش اثر تنش‌های محیطی هم‌چون تنش خشکی در نظر گرفته شود، که این واکنش در گونه‌های زراعی متفاوت می‌باشد. تنش خشکی با شکسته‌شدن کلروپلاست‌ها و کاهش میزان کلروفیل و توقف تولید آن همراه است، که این عمل به‌دلیل تجزیه پروتئین‌ها و در نتیجه افزایش آمینواسیدها هم‌چون پرولین می‌باشد (Esmaeili Monazah *et al*., 2012). کاربرد سیلیکون در گندم باعث بهبود مقدار کلروفیل برگ (Ma *et al*., 2016) و میزان فتوسنتز (Sattar *et al*., 2017) شد. کاربرد سیلیکون در شرایط تنش خشکی در کلزا (Hasanuzzaman *et al*., 2018) باعث محافظت از رنگدانه‌های فتوسنتزی، در خیار باعث افزایش کلروفیل کل و میزان فتوسنتز (Ouzounidou *et al*., 2016)، درگوجه‌فرنگی منجر به حفظ ساختار غشای کلروپلاست (Cao *et al*., 2015) و در گیاه سویا (Shen *et al*., 2010) باعث افزایش کلروفیل کل شد.

٤. نتیجه‌گیری

عملکرد و صفات فیزیولوژیک گیاهی تحت تأثیر تنش خشکی آخر فصل قرار گرفت، به‌طوری‌که کلیه صفات به‌جز میزان پرولین، کربوهیدارت محلول و کلروفیل کل برگ با

کاهش عملکرد همراه بود. سال زراعی به‌دلیل تفاوت در میزان بارندگی بر صفت عملکرد دانه تأثیرگذار بود. سیلیکات‌پتاسیم با تأثیر بر مقاومت روزنه‌ای و محتوای نسبی آب برگ باعث افزایش عملکرد دانه شد. ژنوتیپ‌های موردبررسی تفاوت‌های آشکاری در واکنش به تیمارها داشتند، به‌طوری‌که در شرایط آبیاری کامل، ژنوتیپ OG×AL در صفات ارتفاع بوته، وزن هزاردانه، عملکرد دانه و هم‌چنین محتوای نسبی برگ بر دیگر ژنوتیپ‌ها برتری داشت، درحالی‌که در شرایط تنش خشکی ژنوتیپ RGS×SLM از عملکرد بالاتری برخوردار بود، که حاکی از نمودِ بهتر آن در شرایط تنش است. هرچند محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم می‌تواند اثرات تنش را تعدیل کند، با این‌حال، باید از بروز تنش آخر فصل اجتناب نمود. انتخاب ژنوتیپ مناسب یکی از راه‌کارهای مدیریت کاشت کلزا در شرایط خشکسالی و یا کم‌آبی است و نتایج ما نشان داد که که ژنوتیپ‌های DALGAN و RGS×SLM از عملکرد و پتانسیل بالاتری در این شرایط برخوردار بودند.

۵. تشکر و قدردانی

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

٦. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع

Aein, A. (2011). Changes in the amount of proline, carbohydrate solution and potassium, zinc and calcium absorption in sesame genotypes (*Sesamum indicum* L.) under drought stress. *Crop Production under Environmental Stress Conditions*, *4*(3), 39-48. (In Persian).

Agarie, S., Uchida, H., Agata, W., Kubota, F., & Kaufman, B. (1993). Effect of silicon on growth dry matter production and photosynthesis in rapeseed. *Crop production and improvement technology*, No.34.

Aghdam, A.M., Sayfzadeh, S., Rad, A.S., Valadabadi, S.A., & Zakerin, H.R. (2019). The assessment of water stress and delay cropping on quantitative and qualitative traits of rapeseed genotypes. *Industrial Crops and Products*, *131*, 160-165.

Amin, M., Ahmad, R., Ali, A., Hussain, I., Mahmood, R., Aslam, M., & Lee, D.J. (2018). Influence of silicon fertilization on maize performance under limited water supply. *Silicon*, *10*(2), 177-183.

Amiri, A., Ghanbari, A., Tavasoli, A., Rastgari poor, F., & Roshani, Sh. (2012). Evaluation of quantitative and qualitative traits of rapeseed cultivars under moisture stress conditions and identification of the best cultivar based on resistance indicators. *Crop Physiology*, *4*(15), 17-28. (In Persian).

Aranjuelo, I., Molero, G., Erice, G., Christophe Avice, J., & Nogues, S. (2011). Plant physiology and proteomics reveals the leaf response to drought in alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Experimental Botany*, *62*, 111-123.

Arnon, D. I. (1949). Copper enzymes in isolated chloroplasts, polyphenoxidase in beta vulgaris. *Plant Physiology*, *24*, 1-15.

Artyszak, A., & Kucinska, K. (2016). Silicon nutrition and crop improvement: Recent advances and future perspective. In Silicon in Plants; Tripathi, D.K., Singh, V.P., Ahmad, P., Chauhan, D.K., Prasad, S.M., Eds.; CRC Press: London, UK; New York, NY, USA; 297-319.

Ashraf, M.F.M.R. and Foolad, M.R. (2007). Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environmental and Experimental Botany*, *59*(2), 206-216.

Bahador, M., & Tadayon, M. R. (2020). Investigating of zeolite role in modifying the effect of drought stress in hemp: Antioxidant enzymes and oil content. *Industrial Crops and Products*, *144*, 112042.

Bai, J., Liu, J., Zhang, N., Sa, R., & Jiang, L. (2013). Effect of salt stress on antioxidant enzymes, soluble sugar and yield of oat. *Food Science and Technology*, *5*(3), 303-309.

Bakhat, H.F., Hanstein, S., & Schubert, S. (2009). Optimal level of silicon for maize (*Zea mays* L. c.v. Amadeo) growth in nutrient solution under controlled conditions. *The Proceedings of the International Plant Nutrition Colloquium* XVI, Davis, USA.

Bates, L. S., Waldren, R.P., & Teare, L. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, *39*, 205-207.

Boroujerdnia, M., Bihamta, M., Alami Said, K., & Abdossi, V. (2016). Effect of drought tension on proline content, soluble carbohydrates, electrolytes leakage and relative water content of bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Crop Physiology*, *8*(29), 23-41. (In Persian).

Cao, B., Ma, Q., Zhao, Q., Wang, L., & Xu, K. (2015). Effects of silicon on absorbed light allocation, antioxidant enzymes and ultrastructure of chloroplasts in tomato leaves under simulated drought stress. *Scientia Horticulture*, *194*, 53-62.

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

Dubois, M., Gilles, K.A., Hamilton J.K., Rebers P.T., & Smith, F. (1965). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical chemistry*, *28*(3), 350-356.

Ebrahimiyan, M., Majidi, M. M., Mirlohi, A., & Noroozi, A. (2012). Physiological traits related to drought tolerance in tall fescue. *Euphytica*, *190*, 401-414.

Emam, M. M., Khattab, H. E., Helal, N. M., & Deraz, A. E. (2014). Effect of selenium and silicon on yield quality of rice plant grown under drought stress. *Australian Journal of Crop Science*, *8*, 596.

Epstein, E. (2001). Silicon in plants: facts vs. concepts In: Datnoff LE, Snyder GH, Korndöfer GH, editors. Silicon in agriculture. Amsterdam: *Elsevier*, 1-16.

Esmaeili Monazah, A. Omidi, H., & Bostani, A. (2012). Effects of drought stress on yield, proline, photosynthetic pigments, leaf relative water several genotypes. *Water Research in Agriculture*, *26* (2), 187-196. (In Persian).

Etesamia, H., & Jeong, B.R. (2018). Silicon (Si): review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *147*, 881-896.

FAOSTAT (Food and Agriculture Organization of the United Nations Statistical Database). (2019). FAOSTAT Production Statistics of Crops.

Gao, X., Zou, CH., Wang, L., & Zhang, F. (2004). Silicon improves water use efficiency in maize plants. *Plant Nutrition, 27*, 1457-1470.

Ghorbanli, M., Gafarabad, M., Amirkian, T., & Allahverdi Mamaghani, B. (2013). Investigation of proline, total protein, chlorophyll, ascorbate and dehydro ascorbate changes under drought stress in Akria and Mobil tomato cultivars. *Plant Physiology*, *3*(2), 651-658. (In Persian).

Gong, H., Chen, K., Zhao, Z., Chen, G., & Zhou, W. (2008). Effects of silicon on defense of wheat against oxidative stress under drought at different developmental stages. *Biologia Plantarum*, *52*(3), 592-596.

Gong, H., Chen, K., Chen, G., Wang, S., & Zhang, C. (2003). Effects of silicon on growth of wheat under drought. *Plant Nutrition*, *26*, 1055-1063.

Gugała, M., Sikorska, A., Zarzecka, K., Kapela, K., & Mystkowska, I. (2017). The effect of sowing method and biostimulators on autumn development and overwintering of winter rape. *Acta Scientiarum Polonorum Agricultura*, *16*, 111-120.

Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Anee, T. I., Khan, M. I. R., & Fujita, M. (2018). Silicon-mediated regulation of antioxidant defense and glyoxalase systems confers drought stress tolerance in *Brassica napus* L. *South African Journal of Botany*, *115*, 50-57.

Heidari, N., Pouryousef, M., & Tavakoli, A. (2015). Effects of drought stress on photosynthesis, its parameters and relative water content of anise (*Pimpinella anisum* L.). *Plant Research*, *27*(5), 829-839. (In Persian).

Iqbal, M., Akhtar, N., Zafar, S., & Ali, I. (2008). Genotypic responses for yield and seed oil quality of two Brassica species under semi-arid environmental conditions. *South African Journal of Botany, 74*, 567-571.

Khorasaninejad, S., & Hemmati, K. (2020). Effects of silicon on some phytochemical traits of purple coneflower (*Echinacea purpurea* L.) under salinity. *Scientia Horticulturae*, 108954.

Kim, R. J., Kim, H. U., & Suh, M. C. (2019). Development of camelina enhanced with drought stress resistance and seed oil production by co-overexpression of MYB96A and DGAT1C. *Industrial Crops and Products*, *138*, 111475.

Kim, Y. H., Khan, A. L., Shinwari, Z.K., Kim, D.H., Waqas, M., & Lee, I. J. (2012). Silicon treatment to rice (*Oryza sativa* L. cv 'gopumbyeo') plants during different growth periods and its effects on growth and grain yield. *Pakistan Journal of Botany*, *44*, 891-897.

Kirkegaard, J.A., Sprague, S.J., Dove, H., Kelman, W.M., Marcroft, S.J., Lieschke, A., Howe, G. N., & Graham, J.M. (2008). Dual-purpose canola-A new opportunity in mixed farming systems. *Journal Australian of Agriculture Research*, *59*, 291-302.

Lee, S., Sohn, E., Hamayun, M., Yoon, J., & Lee, I. (2010). Effect of silicon on growth and salinity stress of soybean plant grown under hydroponic system. *Agroforestry Systems*, *80*, 333-340.

Ma, D., Sun, D., Wang, C., Qin, H., Ding, H., Li, Y., & *et al*. (2016). Silicon application alleviates drought stress in wheat through transcriptional regulation of multiple antioxidant defense pathways. *Plant Growth Regulation*, *35*, 1-10.

Mirzaee, M., Moieni, A., & Ghanati, F. (2012). Effect of drought stress on proline and soluble sugar content in canola (*Brassica napus* L.) *seedlings. Biology*, *26*(1), 90-98. (In Persian).

Moradi Aghdam, A., Seyfzadeh, S., Shirani Rad, A. H., Valadabadi, S. A., & Zakerin, H. (2018). Effect of irrigation cut on physiological characteristics and seed yield of canola cultivars under different sowing dates. *Crop Physiology*, *10*(38), 59-76. (In Persian).

Moradshahi, A., Salehi Eskandari, B. And Kholdebarin, B. (2004). Some physiological responses of canola (*Brassica napus* L.) to water defficit stress under laboratory conditions*. Iranian Journal of Science and Technology*, *28*, 43-50.

Naghavi, M.R., Khalili, M., & Abourghadareh, A.P. (2015). Effect of water deficit stress on yield and yield components of canola (*Brassica napus* L.) cultivars. *Agronomy and Agricultural Research*, *7*, 1-8

Nasiri, A., Samdaliri, M., Rad, A.S., Shahsavari, N., Kale, A.M., & Jabbari, H. (2017). Effect of plant density on yield and physiological characteristics of six canola cultivars. *Scientific Agriculture*, 249-253.

Neethirajan, S., Gordon, R., & Wang, L. (2009). Potential of silica bodies (phytoliths) for nanotechnology. *Trends in Biotechnology*, *27*(8), 461-467.

Norton, G., Bilsborrow, P.E., & Shipway, P.A. (1991). Comparative physiology of divergent types of winter rapeseed. Organizing Committee, Saskatoon, 578-582.

Olle, M. (2014). The effect of Silicon on the organically grown cucumber transplants growth and quality. Proceedings of 16th World Fertilizer Congress of CIEC. Rio de Janeiro: CIEC, 90-92.

Ouzounidou, G., Giannakoula, A., Ilias, I., & Zamanidis, P. (2016). Alleviation of drought and salinity stresses on growth, physiology, biochemistry and quality of two *Cucumis sativus* L. cultivars by Si application. *Brazilian Journal of Botany*, *39*, 531-539.

Pang, Z., Tayyab, M., Islam, W., Tarin, M.W.K., Sarfaraz, R., Naveed, H., Zaman, S., Zhang, B., Yuan, Z., & Zhang, H. (2019). Silicon-Mediated Improvement in Tolerance of Economically Important Crops under Drought Stress. *Applied Ecology and Environmental Research*, *17*(3), 6151-6170.

Parida, A.K., Dagaonkar, V.S., Phalak M.S., & Aurangabadkar, L.P. (2008). Differential response of the enzymes involved in proline biosynthesis and degradation in drought tolerant and sensitive cotton genotypes during drought stress and recovery. *Acta Physiologiae Plantarum*, *30*, 619-627.

Payandeh, Kh., Mojdam, M., & Derogar, N. (2018). Application of micronutrient elements on quantitative and qualitative yield of rapeseed under drought tension conditions. *Crop Physiology*, *10*(38), 23-37. (In Persian).

Pirdashti, H., Tahmasebi Sarvestani Z., & Bahmanyar, M.A. (2009). Comparison of physiological response among four contrast rice cultivars under drought stress conditions. World Academy of Science, *Engineering and Technology*, *49*, 52-53.

Pulz, A.L., Crusciol, C.A.C., Lemos, L.B., & Soratto, R. P. (2008). Silicate and limestone effects on potato nutrition, yield and quality under drought stress. *Rev Bras Ciênc Solo*, *32*, 1651-1659.

Rodriguez, D. J. D., Phillips, B. S., Rodriguez-Garcia, R., & Angula- Sanchez, J. L. (2002). Grain yield and fatty acid composition of sunflower seed for cultivars developed under dry land conditions. In: Trends in new crops and new use. Janick, J. and Whipkey. A (eds.). ASHS Press, Alexanderia, VA. 142-139.

Sattar, A., Cheema, M. A., Abbas, T., Sher, A., Ijaz, M., Wahid, M. A., & *et al*. (2017). Physiological response of late sown wheat to exogenous application of silicon. *Cereal Research Communications*, *45*, 202-213.

Shen, X., Zhou, Y., Duan, L., Li, Z., Eneji, A. E., & Li, J. (2010). Silicon effects on photosynthesis and antioxidant parameters of soybean seedlings under drought and ultraviolet -B radiation. *Plant Physiology*, *167*, 1248-1252.

Zarrinabadi, I.G., Razmjoo, J., Mashhadi, A.A., & Boroomand, A. (2019). Physiological response and productivity of pot marigold (*Calendula officinalis*) genotypes under water deficit. *Industrial Crops and Products*, *139*, 111488.