

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده کشاورزی-زراعت

پایان نامه رساله دکتری دانشکده کشاورزی-زراعت

# ارزیابی پاسخ اکوفیزیولوژیک ژنوتیپ‌های بهاره کلزا به محلول پاشی سیلیکات پتاسیم در شرایط تنش خشکی آخر فصل

نگارنده: مژده سادات خیاط مقدم

اساتید راهنما:

دکتر احمد غلامی-دکتر امیرحسین شیرانی راد

اساتید مشاور:

دکتر مهدی برادران فیروزآبادی-دکتر حمید عباسدخت

بهمن ماه ۱۳۹۹

شماره: ۱۰۱/۱۰۱  
تاریخ: ۱۴۰۰/۱۱/۱۶  
ویرایش:

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

پیوست شماره ۲

دانشکده: کشاورزی

گروه: زراعت و اصلاح نباتات

پایان نامه رساله دکتری خانم مزده سادات خیاط مقدم  
تحت عنوان: "ارزیابی پاسخ اکوفیز یولوژیک ژنوتیپ‌های بهاره کلزا به محلول پاشی سیلیکات پتاسیم در شرایط  
تنش خشکی آخر فصل"  
در تاریخ ۱۳۹۹/۱۱/۱۱ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد/ رساله دکتری ارزیابی گردید و با درجه  
عالی مورد پذیرش قرار گرفت.

| امضاء | اساتید مشاور                                        | امضاء | اساتید راهنما                                |
|-------|-----------------------------------------------------|-------|----------------------------------------------|
|       | نام و نام خانوادگی: دکتر مهدی<br>برادران فیروزآبادی |       | نام و نام خانوادگی: دکتر احمد غلامی          |
|       | نام و نام خانوادگی: دکتر حمید<br>عباس دخت           |       | نام و نام خانوادگی: دکتر امیرحسین شیرانی راد |

| امضاء | نماینده تحصیلات تکمیلی                 | امضاء | اساتید داور                                 |
|-------|----------------------------------------|-------|---------------------------------------------|
|       | نام و نام خانوادگی:<br>دکتر خلیل اژدری |       | نام و نام خانوادگی:<br>دکتر عباس بیابانی    |
|       |                                        |       | نام و نام خانوادگی:<br>دکتر محمدرضا عامریان |
|       |                                        |       | نام و نام خانوادگی:<br>دکتر حمیدرضا اصغری   |

تقدیم بہ؛

پدر بزرگوارم، منظر شکستہ  
او کہ امروز من آرزوی دیروزش بود

مادر عزیزم، منظر عشق بی انتہا  
او کہ دعا ہائش فردا بر ایم آسان می کند

خواہران عزیز و برادر عزیزم  
کسانی کہ حامیان و مشوق ہمنگی ام ہستند

# شکر و قدردانی

سپاس ایزد یکتا و بلند مرتبه را که به این حقیر عنایت فرمود تا در وادی علم و دانش گامی دیگر برداشته و مرحله‌ای دیگر از تحصیلات خود را به اتمام رسانم، تا شاید بدین وسیله دریچه دیگری از دریای بیکران او بر من باز گشته و جود بی‌مثالش بر من عیان‌تر گردد، حال به واسطه‌ی این موفقیت لازم می‌دانم تا مراتب سپاس و امتنان خود را نسبت به کلیه عزیزانی که در اجرای این تحقیق یاری‌گر این حقیر بوده‌اند ابراز دارم:

اساتید راهنما جناب آقای دکتر امیرحسین شیرانی‌راد و آقای دکتر احمد غلامی به جهت راهنمایی مدبرانه و دلسوزی بی‌دریغشان که من را در اجرای این تحقیق یاری فرمودند و اساتید مشاور جناب آقای دکتر مهدی برادران فیروزآبادی و آقای دکتر حمید عباسدخت به جهت مشاوره‌های لازم در اجرای این طرح.

همچنین از زحمات اساتید و کارکنان محترم بخش دانه‌های روغنی موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج که اینجانب را در انجام این مهم یاری کردند.

## تعهد نامه

اینجانب مژده سادات خیاط مقدم دانشجوی دوره کارشناسی ارشد (دکتری) رشته فیزیولوژی گیاهان زراعی دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه ارزیابی پاسخ اکوفیزیولوژیک ژنوتیپ‌های بهاره کلزا به محلول پاشی سیلیکات پتاسیم در شرایط تنش خشکی آخر فصل تحت راهنمایی آقای دکتر احمد غلامی و آقای دکتر امیرحسین شیرانی راد متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

## تاریخ

### امضای دانشجو

#### مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود. استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

## چکیده

تنش خشکی یکی از مهمترین عوامل محیطی است که رشد و تولید محصولات زراعی را محدود می‌کند. استفاده از مواد مغذی مانند سیلیکات پتاسیم می‌تواند در افزایش تولید و کیفیت آن به منظور دستیابی به عملکرد دانه و همچنین کاهش اثر نامطلوب تنش خشکی بر کلزا نقش مهمی داشته باشد. به منظور بررسی اثرات تنش خشکی آخر فصل و محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم بر روی عملکرد و اجزای عملکرد در ژنوتیپ‌های بهاره کلزا، آزمایشی به صورت فاکتوریل اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار به مدت دو سال زراعی (۹۵-۹۶ و ۹۶-۹۷) در موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج اجرا شد. در آن آزمایش 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 سیلیکات پتاسیم و عدم محلول‌پاشی) به صورت 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 مورد مطالعه تحت تأثیر تیمارهای کاربردی قرار گرفتند، به طوری که بالاترین عملکرد دانه (۵۶۲۰ کیلوگرم در هکتار)، عملکرد روغن (۲۶۰۱ کیلوگرم در هکتار)، اولئیک اسید (۶۸/۱۶ درصد)، لینولئیک اسید (۱۸/۶۸ درصد) در شرایط آبیاری کامل همراه با محلول‌پاشی در ژنوتیپ OG×AL بدست آمد. ژنوتیپ‌های RGS×SLM و DALGAN نیز در شرایط تنش به همراه محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم بهترین عملکرد دانه را داشتند. تنش خشکی آخر فصل موجب افزایش مقاومت روزه‌ای، پرولین برگ، کربوهیدرات محلول برگ، دمای کانوپی، گلوکوزینولات دانه و کاهش مقدار کلروفیل کل، محتوای نسبی آب برگ، آنزیم‌های کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز و پراکسیداز گردید. در تمام ژنوتیپ‌ها کاربرد سیلیکات پتاسیم با تأثیر بر فرایندهای آنزیمی و متابولیکی، موجب بهبود رشد در شرایط آبیاری معمول و یا افزایش مقاومت و تحمل به تنش در شرایط قطع آبیاری شد. این می‌تواند زمینه‌ای برای راهبردهای جدید برای کاهش خسارات ناشی از تنش خشکی و ایجاد یک ارتباط عملکردی بین نقش سیلیکات پتاسیم، پاسخ فیزیولوژیکی و تحمل به تنش خشکی در گیاه کلزا در اقلیم معتدل سرد کرج و مناطق مشابه باشد. در آبیاری معمول و کاربرد سیلیکات پتاسیم ژنوتیپ OG×AL و در شرایط خشکی آخر فصل و کاربرد سیلیکات پتاسیم ژنوتیپ‌های RGS×SLM و DALGAN قابل توصیه است.

**واژگان کلیدی:** آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت، اسید چرب، پرولین، کلروفیل، گلوکوزینولات.

# پیش‌گفتار

کلزا (*Brassica napus* L.) یکی از مهم‌ترین دانه‌های روغنی در جهان است (ژو و همکاران، ۲۰۱۶). مهم‌ترین فاکتوری که قادر است کشت کلزا را محدود کند تنش خشکی می‌باشد (رشدی و همکاران، ۲۰۱۲). سطح زیر کشت این محصول در جهان طبق گزارش سازمان خواروبار جهانی (FAO) بیش از ۳۶ میلیون هکتار می‌باشد (فائو، ۲۰۱۸). در ایران سطح زیر کشت در سال زراعی ۹۹-۱۳۹۸ معادل ۶۱۶ هزار هکتار بوده است (وزارت جهاد کشاورزی، ۲۰۲۰). در سال‌های اخیر توسعه، ترویج و کشت آن افزایش قابل ملاحظه‌ای یافته است. سازگاری کلزا با اقلیم‌های مختلف باعث مهم بودن این محصول شده است و به عنوان نقطه عطفی جهت تولید روغن خوراکی مورد نیاز کشور به شمار می‌رود.

خشکی اصلی‌ترین عامل محدودکننده تولید و رشد کلزا در بین تنش‌های غیرزنده می‌باشد (رشدی و همکاران، ۲۰۱۲؛ مرادشاهی و همکاران، ۲۰۰۴). خشکی یکی از پارامترهای محیطی است که به محصولات کشاورزی آسیب می‌رساند و بر رشد، نمو و تولید گیاهان تأثیر گذار است (اونگام و همکاران، ۲۰۱۶؛ کاتمن و همکاران، ۲۰۱۶؛ میشل‌تو و همکاران، ۲۰۰۷). این نوع تنش بر فرایندهای فیزیولوژیکی (سارکر و همکاران، ۲۰۰۵)، بیوشیمیایی (فاضلی و همکاران، ۲۰۰۷)، مورفولوژیکی و مولکولی در گیاهان تأثیر به سزایی داشته و منجر به ممانعت از رشد، انسداد روزنه‌ها با کاهش نسبی تعرق، کاهش میزان کلروفیل، جلوگیری از فتوسنتز، تغییر در ماهیت پروتئین‌ها و تغییرات اسمزی در بافت گیاه می‌شود (دمیروسکا و همکاران، ۲۰۰۸). خشکی میزان متوسط تولید گونه‌های مختلف زراعی را کاهش می‌دهد (رابرتسون و هولاند، ۲۰۰۴). ژنوتیپ‌های متحمل به تنش کلزا توانایی بیشتری برای سازگاری خود تحت شرایط خشکی دارند. تنوع زنتیکی ارقام کلزا، ژن‌های ارزشمندی را برای تحمل به خشکی فراهم کرده است (حسینی و حسینی، ۲۰۱۱). خشکی معمولاً رشد گیاه و عملکرد آن را در مناطق خشک و نیمه خشک در سرتاسر جهان کاهش می‌دهد (زاندلیناز و همکاران،

۲۰۱۸). اثرات منفی آن بر زیست توده گیاهی و رشد انواع محصولات زراعی که در مزارع کشت می‌شوند شایان ذکر است (کوشال و وانی، ۲۰۱۶).

از آنجایی که اکثر اراضی زراعی کشور در مناطق خشک و نیمه خشک قرار دارند، استفاده بهینه از کودهای شیمیایی به صورت خاکی چندان رضایت بخش نیست. کمبود نزولات جوی و عدم تأمین آب کافی در اواخر دوره رشد، جذب عناصر ریز مغذی از خاک توسط گیاهان را محدود می‌کند. خاک‌های ایران به دلیل آهکی بودن، بی‌کربناته بودن و مصرف زیاد از حد کودهای فسفات دارای کمبود عناصر ریزمغذی‌ها هستند (رجبی و همکاران، ۲۰۱۳؛ شهسواری، ۲۰۱۹). این عناصر نقش مهمی در تمایز، رشد و استحکام دیواره سلولی دارد، که بیشتر منجر به مقاومت گیاهان به بیماری‌ها و آفات می‌شوند. محلول‌پاشی عناصر کم مصرف باعث افزایش کارایی ریزمغذی‌ها می‌شود (نریمانی و همکاران، ۲۰۱۰). محلول‌پاشی می‌تواند منجر به تغذیه مناسب‌تر، تحمل به خشکی و افزایش محصول با کیفیت گردد. میزان کاربرد محلول‌پاشی نسبت به کاربرد در خاک کمتر است. محلول‌پاشی قادر است همان تأثیر را به آسانی ایجاد کند و محصول بلافاصله به کاربرد مواد مغذی واکنش نشان می‌دهد (زاید و همکاران، ۲۰۱۱).

سیلیکون (Si) دومین عنصر فراوان بعد از اکسیژن در خاک است. همه گیاهان ریشه‌ای حاوی مقداری سیلیکون در سلول‌ها و بافت‌های خود هستند (أل، ۲۰۱۴). این عنصر یکی از فراوان‌ترین عناصر معدنی در بافت گیاهی است (ژو و همکاران، ۲۰۰۴؛ کیم و همکاران، ۲۰۱۲). ترکیبات سیلیکاتی قادرند با محافظت در برابر بیماری‌ها، حمله حشرات، تقویت و محافظت از مواد مغذی در شرایط نامساعد از جمله؛ خشکی، شوری یا سمیت فلزات سنگین برای گیاهان مفید واقع شوند (دبونا و همکاران، ۲۰۱۷؛ طیب و همکاران، ۲۰۱۸). محققان مختلف ثابت کرده‌اند که ترکیبات سیلیکاتی، باید به عنوان یک رویکرد عملی برای غلبه بر اثرات مخرب تنش خشکی مطرح شود (شی و همکاران، ۲۰۱۴؛ گو و همکاران، ۲۰۱۷).

این تحقیق به منظور بررسی تأثیر محلول پاشی سیلیکات پتاسیم بر صفات زراعی ارقام و لاین‌های امید بخش کلزا بهاره در شرایط خشکی آخر فصل جهت توسعه کشت کلزا در مناطق معتدل و نیمه خشک کشور طراحی و اجرا شد. لذا چنانچه بتوان لاین یا رقمی را معرفی کرد که در شرایط تنش خشکی و از طریق محلول پاشی سیلیکات پتاسیم، عملکرد اقتصادی قابل قبولی تولید نمایند و تحمل به تنش بالاتری داشته باشند می‌توان به سطح زیر کشت کلزا اضافه نمود.

# لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

۱- بررسی صفات زراعی ژنوتیپ‌های بهاره کلزا در شرایط تنش خشکی آخر فصل و محلول‌پاشی

سیلیکات‌پتاسیم (تنش‌های محیطی در علوم زراعی)

۲- اثر سیلیکات‌پتاسیم و تنش خشکی آخر فصل بر خصوصیات فیزیولوژیکی کلزا (به‌زراعی

کشاورزی)

۳- تأثیر محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم بر برخی ویژگی‌های مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و

بیوشیمیایی ژنوتیپ‌های بهاره کلزا تحت تنش خشکی آخر فصل (پژوهش‌های گیاهی).

# فهرست مطالب

## فصل ۱: مقدمه و کلیات

۱

۱-۱ مقدمه..... ۲

۲-۱ کلزا..... ۳

۱-۲-۱ تاریخچه کشت کلزا در ایران و جهان..... ۵

۲-۲-۱ گیاه شناسی کلزا..... ۸

۱-۲-۲-۱ ریشه..... ۸

۲-۲-۲-۱ ساقه..... ۸

۳-۲-۲-۱ برگ..... ۸

۴-۲-۲-۱ گل..... ۸

۵-۲-۲-۱ میوه..... ۹

۶-۲-۲-۱ بذر..... ۹

۷-۲-۲-۱ ارقام کلزا..... ۹

۳-۲-۱ فنولوژی کلزا..... ۱۰

۴-۲-۱ سازگاری و پراکندگی کلزا..... ۱۱

۵-۲-۱ مزیت های نسبی کلزا نسبت به سایر دانه های روغنی..... ۱۴

۳-۱ تنش خشکی..... ۱۶

۱-۳-۱ مکانیسم های سازگاری گیاهان به خشکی..... ۱۷

۱-۳-۱-۱ مقاومت به خشکی..... ۱۸

۲-۳-۱-۲ گریز از خشکی..... ۱۸

۳-۳-۱-۳ تحمل به خشکی..... ۱۸

- ۱۹ ..... ۴-۱-۳-۱ اجتناب از خشکی
- ۱۹ ..... ۵-۱-۳-۱ بهبود از خشکی
- ۱۹ ..... ۴-۱ سیلیکون
- ۲۰ ..... ۱-۴-۱ تاریخچه کاربرد سیلیکون
- ۲۱ ..... ۲-۴-۱ جذب و تجمع سیلیکون در گیاهان

## ۲۳ فصل ۲: بررسی منابع

- ۲۴ ..... ۱-۲ خشکی و اثرات ناشی از آن در گیاهان زراعی
- ۲۵ ..... ۱-۱-۲ تأثیر تنش خشکی بر برخی صفات مورفولوژیکی
- ۲۵ ..... ۱-۱-۱-۲ ارتفاع بوته
- ۲۶ ..... ۲-۱-۱-۲ قطر ساقه
- ۲۷ ..... ۳-۱-۱-۲ تعداد شاخه در بوته
- ۲۷ ..... ۴-۱-۱-۲ طول خورجین
- ۲۸ ..... ۲-۱-۲ تأثیر تنش خشکی بر صفات عملکرد و اجزا عملکرد
- ۲۸ ..... ۱-۲-۱-۲ تعداد خورجین در بوته
- ۲۸ ..... ۲-۲-۱-۲ تعداد دانه در خورجین
- ۳۰ ..... ۳-۲-۱-۲ وزن هزار دانه
- ۳۰ ..... ۴-۲-۱-۲ عملکرد بیولوژیکی
- ۳۱ ..... ۵-۲-۱-۲ عملکرد دانه
- ۳۲ ..... ۶-۲-۱-۲ شاخص برداشت
- ۳۳ ..... ۳-۱-۲ تأثیر تنش خشکی بر برخی صفات فیزیولوژیکی
- ۳۳ ..... ۱-۳-۱-۲ محتوای نسبی آب برگ
- ۳۴ ..... ۲-۳-۱-۲ مقاومت روزه‌ای

|    |                                                   |
|----|---------------------------------------------------|
| ۳۶ | ۲-۱-۳-۳ دمای کانوپی.....                          |
| ۳۶ | ۲-۱-۴ تأثیر تنش خشکی بر برخی صفات بیوشیمیایی..... |
| ۳۶ | ۲-۱-۴-۱ پرولین.....                               |
| ۳۸ | ۲-۱-۴-۲ کلروفیل.....                              |
| ۳۹ | ۲-۱-۴-۳ کربوهیدرات برگ.....                       |
| ۴۰ | ۲-۱-۴-۴ گلوکوزینولات.....                         |
| ۴۲ | ۲-۱-۴-۵ درصد و عملکرد روغن.....                   |
| ۴۳ | ۲-۱-۴-۶ اسیدهای چرب.....                          |
| ۴۵ | ۲-۱-۴-۷ فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدان.....        |
| ۴۷ | ۲-۲ ترکیبات سیلیکاتی و تنش خشکی.....              |

۲-۲-۱ بهبود دهندگی ترکیبات سیلیکاتی در رشد گیاه، زیست توده و فتوسنتز در تنش

|    |           |
|----|-----------|
| ۴۹ | خشکی..... |
|----|-----------|

|    |                          |
|----|--------------------------|
| ۵۲ | ۲-۲-۲ تنش اکسیداتیو..... |
|----|--------------------------|

### فصل ۳: مواد و روش ها ۵۵

|    |                                                                    |
|----|--------------------------------------------------------------------|
| ۵۶ | ۳-۱ زمان آزمایش و خصوصیات اقلیمی و جغرافیایی محل اجرای آزمایش..... |
| ۵۶ | ۳-۲ مشخصات خاک محل آزمایش.....                                     |
| ۵۷ | ۳-۳ خصوصیات طرح آزمایشی.....                                       |
| ۵۸ | ۳-۴ مراحل تهیه بستر کشت.....                                       |
| ۵۹ | ۳-۵ صفات نمونه برداری و اندازه گیری شده.....                       |
| ۵۹ | ۳-۵-۱ صفات مورفولوژیکی.....                                        |
| ۶۰ | ۳-۵-۲ صفات مربوط به عملکرد و اجزا عملکرد.....                      |

- ۳-۵-۳ صفات فیزیولوژیکی..... ۶۰
- ۳-۵-۴ صفات بیوشیمیایی..... ۶۰
- ۳-۶-۶ روش اندازه گیری صفات..... ۶۰
- ۳-۶-۱ ارتفاع بوته..... ۶۰
- ۳-۶-۲ قطر ساقه..... ۶۱
- ۳-۶-۳ تعداد شاخه در بوته..... ۶۱
- ۳-۶-۴ تعداد خورجین در بوته..... ۶۱
- ۳-۶-۵ طول خورجین..... ۶۱
- ۳-۶-۶ تعداد دانه در خورجین..... ۶۱
- ۳-۶-۷ وزن هزار دانه..... ۶۲
- ۳-۶-۸ عملکرد بیولوژیکی..... ۶۲
- ۳-۶-۹ عملکرد دانه..... ۶۲
- ۳-۶-۱۰ شاخص برداشت..... ۶۲
- ۳-۶-۱۱ درصد روغن دانه..... ۶۳
- ۳-۶-۱۲ عملکرد روغن دانه..... ۶۳
- ۳-۶-۱۳ محتوی نسبی آب برگ..... ۶۳
- ۳-۶-۱۴ مقاومت روزه ای..... ۶۴
- ۳-۶-۱۵ دمای کانوپی..... ۶۴
- ۳-۶-۱۶ کلروفیل برگ..... ۶۵
- ۳-۶-۱۷ پرولین..... ۶۶
- ۳-۶-۱۸ کربوهیدرات محلول برگ..... ۶۸

|     |                                                   |
|-----|---------------------------------------------------|
| ۶۹  | ..... گلوکوزینولات ۱۹-۶-۳                         |
| ۶۹  | ..... پروفیل اسیدهای چرب ۲۰-۶-۳                   |
| ۷۰  | ..... فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدان ۲۱-۶-۳        |
| ۷۶  | ..... تجزیه و تحلیل آماری ۲۲-۶-۳                  |
| ۷۷  | فصل ۴: نتایج و بحث                                |
| ۷۸  | ..... ۱-۴ صفات مورفولوژیک                         |
| ۷۸  | ..... ۱-۱-۴ ارتفاع بوته                           |
| ۸۰  | ..... ۲-۱-۴ قطر ساقه                              |
| ۸۱  | ..... ۳-۱-۴ تعداد شاخه در بوته                    |
| ۸۳  | ..... ۴-۱-۴ طول خورجین                            |
| ۸۶  | ..... ۲-۴ صفات فیزیولوژیک                         |
| ۸۶  | ..... ۱-۲-۴ محتوی نسبی آب برگ                     |
| ۹۰  | ..... ۲-۲-۴ مقاومت روزنه‌ای                       |
| ۹۳  | ..... ۳-۲-۴ دمای کانوپی                           |
| ۹۸  | ..... ۳-۴ صفات مربوط به عملکرد و وابسته به عملکرد |
| ۹۸  | ..... ۱-۳-۴ تعداد خورجین در بوته                  |
| ۱۰۰ | ..... ۲-۳-۴ تعداد دانه در خورجین                  |
| ۱۰۲ | ..... ۳-۳-۴ وزن هزار دانه                         |
| ۱۰۴ | ..... ۴-۳-۴ شاخص برداشت                           |
| ۱۰۴ | ..... ۵-۳-۴ عملکرد بیولوژیکی                      |
| ۱۰۷ | ..... ۶-۳-۴ عملکرد دانه                           |
| ۱۱۲ | ..... ۴-۴ صفات بیوشیمیایی                         |

|     |                                               |
|-----|-----------------------------------------------|
| ۱۱۲ | ۱-۴-۴ پرولین برگ.....                         |
| ۱۱۵ | ۲-۴-۴ کلروفیل a.....                          |
| ۱۱۸ | ۳-۴-۴ کلروفیل b.....                          |
| ۱۲۰ | ۴-۴-۴ کلروفیل کل.....                         |
| ۱۲۲ | ۵-۴-۴ میزان کربوهیدرات محلول برگ.....         |
| ۱۳۰ | ۶-۴-۴ درصد روغن دانه.....                     |
| ۱۳۱ | ۷-۴-۴ عملکرد روغن.....                        |
| ۱۳۴ | ۸-۴-۴ میزان گلوکوزینولات دانه.....            |
| ۱۳۶ | ۹-۴-۴ ترکیب اسیدهای چرب.....                  |
| ۱۳۶ | ۱-۹-۴-۴ اولئیک اسید.....                      |
| ۱۳۹ | ۲-۹-۴-۴ لینولئیک اسید.....                    |
| ۱۴۱ | ۳-۹-۴-۴ اروسیک اسید.....                      |
| ۱۴۹ | ۱۰-۴-۴ فعالیت‌های آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان..... |
| ۱۴۹ | ۱-۱۰-۴-۴ سوپر اکسید دیسموتاز.....             |
| ۱۵۲ | ۲-۱۰-۴-۴ کاتالاز.....                         |
| ۱۵۶ | ۳-۱۰-۴-۴ پراکسیداز.....                       |
| ۱۵۹ | ۵-۴ تجزیه همبستگی صفات کلزا.....              |

## فصل ۵: نتیجه‌گیری کلی

|     |                     |
|-----|---------------------|
| ۱۶۳ |                     |
| ۱۶۴ | ۱-۵ نتیجه‌گیری..... |
| ۱۶۷ | ۲-۵ پیشنهادات.....  |

|     |       |
|-----|-------|
| ۱۶۸ | مراجع |
|-----|-------|

# فهرست جداول

- جدول ۱-۱- ترکیبات اسیدهای چرب روغن کلزا..... ۵
- جدول ۱-۲- مراحل فنولوژی کلزا..... ۱۳
- جدول ۱-۳- میانگین ماهانه بارش (میلی متر) و دما (سانتی گراد) در طول فصل رشد..... ۵۶
- جدول ۲-۳- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک ..... ۵۷
- جدول ۱-۴- نتایج تجزیه مرکب صفات مورفولوژیک کلزا..... ۸۵
- جدول ۲-۴- مقایسه میانگین اثر سال بر صفات مورفولوژیک در کلزا..... ۸۵
- جدول ۳-۴- مقایسه میانگین برهمکنش سه گانه بر طول خورجین..... ۸۶
- جدول ۴-۴- نتایج تجزیه مرکب برخی صفات فیزیولوژیک کلزا..... ۹۵
- جدول ۵-۴- تجزیه واریانس دمای کانوپی تحت تأثیر آبیاری، سیلیکات پتاسیم و ژنوتیپ در دو سال..... ۹۶
- جدول ۶-۴- مقایسه میانگین برهمکنش سه گانه بر صفات مورد بررسی در ژنوتیپ های کلزا..... ۹۷
- جدول ۷-۴- مقایسه میانگین دمای کانوپی کلزا تحت تأثیر آبیاری، سیلیکات پتاسیم و ژنوتیپ..... ۹۸
- جدول ۸-۴- نتایج تجزیه مرکب صفات عملکرد و اجزای عملکرد مورد بررسی کلزا..... ۱۱۰
- جدول ۹-۴- مقایسه میانگین برهمکنش سه گانه بر صفات مورد بررسی در ژنوتیپ های کلزا..... ۱۱۱
- جدول ۱۰-۴- مقایسه میانگین اثر سال بر عملکرد و اجزای عملکرد در کلزا..... ۱۱۲
- جدول ۱۱-۴- نتایج تجزیه مرکب صفات بیوشیمیایی کلزا..... ۱۲۷
- جدول ۱۲-۴- تجزیه واریانس کربوهیدرات محلول برگ تحت تأثیر آبیاری، محلول پاشی و ژنوتیپ کلزا..... ۱۲۸
- جدول ۱۳-۴- مقایسه میانگین برهمکنش سه گانه آبیاری×سیلیکات پتاسیم×ژنوتیپ بر صفات..... ۱۲۹
- جدول ۱۴-۴- نتایج تجزیه مرکب برخی صفات بیوشیمیایی کلزا..... ۱۴۵
- جدول ۱۵-۴- تجزیه واریانس اروسیک اسید کلزا تحت تأثیر آبیاری، محلول پاشی و ژنوتیپ ..... ۱۴۶

جدول ۴-۱۶- مقایسه میانگین برهمکنش سه گانه بر صفات مورد بررسی در ژنوتیپ‌های کلزا..... ۱۴۷

جدول ۴-۱۷- مقایسه میانگین اروسیک اسید کلزا تحت تأثیر آبیاری، محلول پاشی و ژنوتیپ..... ۱۴۸

جدول ۴-۱۸- نتایج تجزیه مرکب برخی صفات مورد بررسی کلزا..... ۱۵۹

جدول ۴-۱۹- ضرایب همبستگی پیرسون بین برخی صفات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی کلزا..... ۱۶۲

# فهرست اشکال

- شکل ۱-۱- تولید جهانی دانه‌های روغنی (میلیون تن) در سال ۲۰۲۰-۲۰۱۹..... ۷
- شکل ۱-۲- مکانیسم سیلیکون برای تحمل به خشکی در گیاهان..... ۴۸
- شکل ۱-۴- برهمکنش آبیاری×سیلیکات پتاسیم بر صفت ارتفاع بوته به روش برش‌دهی..... ۷۹
- شکل ۲-۴- برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ بر صفت ارتفاع بوته به روش برش‌دهی..... ۸۰
- شکل ۳-۴- برهمکنش سطوح آبیاری×ژنوتیپ بر صفت قطر ساقه به روش برش‌دهی..... ۸۱
- شکل ۴-۴- برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ بر صفت تعداد شاخه در بوته به روش برش‌دهی..... ۸۲
- شکل ۵-۴- مقایسه میانگین اثر محلول پاشی سیلیکات پتاسیم بر صفت تعداد شاخه در بوته ..... ۸۳
- شکل ۶-۴- برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ بر صفت طول خورجین به روش برش‌دهی..... ۸۴
- شکل ۷-۴- برهمکنش آبیاری×سیلیکات پتاسیم بر صفت محتوای نسبی آب برگ..... ۸۹
- شکل ۸-۴- برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ بر صفت محتوای نسبی آب برگ به روش برش‌دهی ..... ۸۹
- شکل ۹-۴- برهمکنش سیلیکات پتاسیم×ژنوتیپ بر صفت محتوای نسبی آب برگ..... ۹۰
- شکل ۱۰-۴- برهمکنش سال×آبیاری بر صفت مقاومت روزنه‌ای به روش برش‌دهی..... ۹۱
- شکل ۱۱-۴- برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ بر صفت مقاومت روزنه‌ای به روش برش‌دهی..... ۹۱
- شکل ۱۲-۴- مقایسه میانگین اثر سیلیکات پتاسیم بر مقاومت روزنه‌ای به روش برش‌دهی..... ۹۲
- شکل ۱۳-۴- برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ بر صفت تعداد خورجین در بوته به روش برش‌دهی..... ۱۰۰
- شکل ۱۴-۴- برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ بر صفت تعداد دانه خورجین به روش برش‌دهی..... ۱۰۱
- شکل ۱۵-۴- برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ بر صفت وزن هزار دانه به روش برش‌دهی..... ۱۰۳
- شکل ۱۶-۴- برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ بر عملکرد بیولوژیکی به روش برش‌دهی..... ۱۰۶
- شکل ۱۷-۴- برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ بر عملکرد دانه به روش برش‌دهی..... ۱۰۸

- شکل ۴-۱۸- برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ بر پرولین برگ به روش برش دهی..... ۱۱۳
- شکل ۴-۱۹- برهمکنش اثر سه گانه سال×آبیاری×ژنوتیپ بر صفت پرولین برگی..... ۱۱۴
- شکل ۴-۲۰- مقایسه میانگین اثر آبیاری بر کلروفیل a به روش برش دهی..... ۱۱۷
- شکل ۴-۲۱- مقایسه میانگین اثر سیلیکات پتاسیم بر کلروفیل a به روش برش دهی..... ۱۱۷
- شکل ۴-۲۲- مقایسه میانگین اثر ژنوتیپ بر کلروفیل a به روش برش دهی..... ۱۱۸
- شکل ۴-۲۳- برهمکنش سال×آبیاری بر کلروفیل b به روش برش دهی..... ۱۱۹
- شکل ۴-۲۴- برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ بر کلروفیل b به روش برش دهی..... ۱۱۹
- شکل ۴-۲۵- برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ بر کلروفیل کل به روش برش دهی..... ۱۲۱
- شکل ۴-۲۶- مقایسه میانگین اثر ساده ژنوتیپ بر کربوهیدرات محلول برگ در سال زراعی اول..... ۱۲۳
- شکل ۴-۲۷- مقایسه میانگین اثر ساده ژنوتیپ بر کربوهیدرات محلول برگ در سال زراعی دوم..... ۱۲۳
- شکل ۴-۲۸- برهمکنش آبیاری×سیلیکات پتاسیم بر کربوهیدرات محلول برگ در سال زراعی اول..... ۱۲۴
- شکل ۴-۲۹- برهمکنش آبیاری×سیلیکات پتاسیم بر کربوهیدرات محلول برگ در سال زراعی دوم..... ۱۲۴
- شکل ۴-۳۰- برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ بر صفت درصد روغن به روش برش دهی..... ۱۳۱
- شکل ۴-۳۱- مقایسه میانگین اثر سیلیکات پتاسیم بر صفت درصد روغن به روش برش دهی..... ۱۳۱
- شکل ۴-۳۲- مقایسه میانگین اثر سال بر عملکرد روغن روش برش دهی..... ۱۳۳
- شکل ۴-۳۳- برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ بر عملکرد روغن به روش برش دهی..... ۱۳۴
- شکل ۴-۳۴- برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ بر گلوکوزینولات دانه به روش برش دهی..... ۱۳۶
- شکل ۴-۳۵- برهمکنش سال در آبیاری بر میزان اولئیک اسید به روش برش دهی..... ۱۳۸
- شکل ۴-۳۶- برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ بر درصد اولئیک اسید به روش برش دهی..... ۱۳۸
- شکل ۴-۳۷- برهمکنش آبیاری×سیلیکات پتاسیم بر درصد اولئیک اسید در سال زراعی دوم..... ۱۳۹
- شکل ۴-۳۸- برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ بر درصد لینولئیک اسید به روش برش دهی..... ۱۴۱
- شکل ۴-۳۹- برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ بر درصد اروسیک اسید در سال زراعی اول..... ۱۴۲

- شکل ۴-۴۰- برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ بر درصد اروسیک اسید در سال زراعی دوم..... ۱۴۳
- شکل ۴-۴۱- برهمکنش سال×آبیاری بر آنزیم سوپراکسید دیسموتاز به روش برش دهی..... ۱۵۰
- شکل ۴-۴۲- برهمکنش آبیاری×سیلیکات پتاسیم بر آنزیم سوپراکسید دیسموتاز ..... ۱۵۰
- شکل ۴-۴۳- برهمکنش سطوح آبیاری×ژنوتیپ بر آنزیم سوپراکسید دیسموتاز..... ۱۵۰
- شکل ۴-۴۴- برهمکنش آبیاری×سیلیکات پتاسیم بر آنزیم کاتالاز به روش برش دهی..... ۱۵۳
- شکل ۴-۴۵- برهمکنش سطوح آبیاری×ژنوتیپ بر آنزیم کاتالاز به روش برش دهی..... ۱۵۳
- شکل ۴-۴۶- برهمکنش سیلیکات پتاسیم×ژنوتیپ بر آنزیم کاتالاز به روش برش دهی..... ۱۵۳
- شکل ۴-۴۷- برهمکنش سال×آبیاری بر آنزیم پراکسیداز به روش برش دهی..... ۱۵۷
- شکل ۴-۴۸- برهمکنش آبیاری×سیلیکات پتاسیم بر آنزیم پراکسیداز به روش برش دهی..... ۱۵۸
- شکل ۴-۴۹- برهمکنش سطوح آبیاری×ژنوتیپ بر آنزیم پراکسیداز به روش برش دهی..... ۱۵۸

# فصل ۱: مقدمه و کلیات

## ۱-۱ مقدمه

تنش‌های غیرزنده، تأثیر به سزایی بر بهره‌وری محصول، خصوصیات زراعی و بیوشیمیایی گیاهان زراعی دارد. همچنین با اختلال در رشد و نمو، عملکرد بسیاری از گونه‌های زراعی را بین ۵۱ تا ۸۲٪ کاهش می‌دهد (کوک و لیثمن، ۲۰۱۶). تنش خشکی از مهمترین تنش‌های غیر زنده به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک در سراسر جهان است (زاندالیناز و همکاران، ۲۰۱۸)، که بر رشد و نمو محصول زراعی تأثیر منفی داشته و منجر به کاهش کیفیت و عملکرد محصول می‌گردد (وانگ و همکاران، ۲۰۱۷). گیاهان برای مقابله با تنش خشکی استراتژی‌های مورفوفیزیولوژیکی و بیوشیمیایی خود را تکامل داده‌اند (ایجاز و همکاران، ۲۰۱۷). تنش خشکی با تشکیل گونه‌های اکسیژن فعال، منجر به تنش ثانویه می‌شود، که در نهایت باعث تغییر در مسیر بیوسنتز متابولیت‌های ثانویه می‌گردد (فاروق و همکاران، ۲۰۰۹). گونه‌های اکسیژن فعال باعث تخریب پروتئین، پراکسیداسیون لیپیدها، قطعه قطعه شدن DNA، آسیب و مرگ سلولی می‌شوند. گیاهان برای دفاع در مقابل گونه‌های اکسیژن فعال (ROS) از دو سیستم آنزیمی و غیر آنزیمی استفاده می‌کنند. سیستم اول (آنزیمی) در واقع آنزیم‌های ضد اکسید کننده مانند کاتالاز، پراکسیداز و گلوکاتایون ردوکتاز هستند که نقش اصلی آنها تجزیه  $H_2O_2$  است (احمد و حداد، ۲۰۱۱). سیستم دوم (غیرآنزیمی) که شامل مواد محلول آلی مانند اسمولیت‌ها و تولید پلی‌آمین‌ها و پروتئین‌های جدید می‌باشند (میتلر، ۲۰۰۶).

در مطالعات متعددی گزارش شده است که کاربرد سیلیکون موجب افزایش تحمل به تنش خشکی می‌شود (گونگ و همکاران، ۲۰۰۸). سیلیکون برای گیاهان بسیار مفید است، به ویژه هنگامی که آنها در معرض تنش‌های محیطی قرار می‌گیرند (ال آقاباری و همکاران، ۲۰۰۵). اثرات مثبت سیلیکون بر رشد، نمو و عملکرد گیاهان زراعی جهت کاهش تأثیر تنش خشکی گزارش شده است (بای بوردی، ۲۰۱۴).

تنش خشکی از معضلات مهم تولید کلزا در مناطق خشک و نیمه خشک است و شناخت روش‌های نوین در افزایش محصول و کاربرد عناصری که در بالا بردن مقاومت گیاهان به این نوع تنش موثر هستند، دارای اهمیت است. بدین منظور در این تحقیق، تأثیر محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم بر عملکرد و اجزای عملکرد، اسیدهای چرب و میزان آنزیم‌های آنتی اکسیدانت در ارقام و لاین‌های امیدبخش بهاره کلزا در شرایط خشکی آخر فصل بررسی شد.

## ۱-۲ کلزا

کلزا از خانواده چلیپاییان (Brassicaceae) و جنس *Brassica* بوده که پنج گونه از این جنس براسیکا به نام‌های کلزا (*Brassica napus* L.)، شلغم روغنی (*Brassica rapa* L.)، خردل هندی (*Brassica juncea* L.)، خردل حبشی (*Brassica carinata* L.) و خردل سفید (*Sinapis alba* L.) در سطح جهان به عنوان دانه روغنی شناخته شده است. مهم‌ترین گونه‌های زراعی آن کلزا (*Brassica napus* L.)، شلغم روغنی (*Brassica rapa* L.)، خردل هندی (*Brassica juncea* L.)، می‌باشد که برای تولید روغن کشت می‌شوند (شیرانی‌راد، ۱۳۸۱).

اصطلاح کانولا به کلزایی اطلاق می‌گردد که حاوی اسیداروسیک کمتر از دو درصد در روغن خود و گلوکوزینولات کمتر از ۳۰ میکرومول بر گرم در کنجاله خود باشد (عزیزی و همکاران، ۱۳۷۸؛ لین و همکاران، ۲۰۱۳؛ مک وتی و دانکن، ۲۰۱۵؛ مگ، ۱۹۸۳). این دو ویژگی دانه کلزا، روغن آن را برای تغذیه انسان و دام به دلیل پروتئین بالا مناسب کرده است (رودی و همکاران، ۱۳۸۲). تناسب لینولئیک اسید به لینولنیک اسید در روغن آن یک به دو بود، که برای مصرف انسان مناسب است (فائو، ۲۰۱۵).

کلزا دارای منابع فراوان اسیدهای چرب و پروتئین است (نواب پور، ۱۳۹۲). مهم‌ترین گونه زراعی جنس براسیکا ژنوتیپ‌های بهاره و پاییزه با عدد کروموزومی ۳۸ کروموزوم هستند. که منبع

روغن گیاهی بوده، ولی ارقام زمستانه آن در شرایط اقلیمی معتدل، خنک و رطوبتی بالاترین عملکرد دانه را دارا می‌باشند (آلیاری و همکاران، ۱۳۷۹؛ شیرانی‌راد و دهشیری، ۱۳۸۱). روغن کلزا با توجه به درصد پایین اسیدهای چرب اشباع آن نسبت به دیگر روغن‌ها به عنوان یک روغن خوراکی مفید محسوب می‌شود (تورینک و همکاران، ۲۰۱۶).

برحسب میزان اروسیک اسید گیاهان جنس براسیکا به دو گروه عمده تقسیم می‌شوند. گروه اول که با علامت اختصاری HEAR<sup>۱</sup> مشخص می‌گردند، روغن آنها دارای بیش از پنج درصد اروسیک اسید بوده و در صنعت و همچنین به عنوان روان‌کننده در دستگاه‌های صنعتی و موتور جت کاربرد دارند و مصرف خوراکی ندارند. گروه دوم که با علامت اختصاری LEAR<sup>۲</sup> بوده که روغن آنها با کمتر از پنج درصد اروسیک اسید، مصرف خوراکی دارند (شیرانی‌راد و دهشیری، ۱۳۸۱).

با افزایش کیفیت در سالیان اخیر، روغن این گونه گیاهی مورد محبوبیت عموم قرار گرفته است. در حال حاضر روغن کانولا، پس از سویا و نخل روغنی، مقام سوم تولید جهانی روغن را به خود اختصاص داده است (بری و اسپینک، ۲۰۰۶؛ محمد و همکاران، ۲۰۰۷). ترکیب اسیدهای چرب روغن کلزا در جدول ۱-۱ نشان داده شده است (شیرانی‌راد و دهشیری، ۱۳۸۱).

---

-High erucic acid rapeseed (HEAR)  
-Low erucic acid rapeseed (LEAR)

جدول ۱-۱ - ترکیبات اسیدهای چرب روغن کلزا

| نوع اسید چرب            | کلزای سنتی<br>(HEAR) | کلزای یک صفر<br>(LEAR) | کلزای دو صفر |
|-------------------------|----------------------|------------------------|--------------|
| اشباع شده (درصد)        |                      |                        |              |
| ۱۶:۰ (پالمیتیک)         | ۱/۷                  | ۳/۵                    | ۴            |
| ۱۸:۰ (استئاریک)         | ۰/۹                  | ۱/۵                    | ۱/۴          |
| ۲۰:۰ (دکوزانوییک)       | ۰/۹                  | ۰/۳                    | ۰/۳          |
| ۲۴:۰ (لیگنوسریک)        | ۰/۵                  | ۰/۱                    | ۰/۱          |
| با پیوند دو گانه (درصد) |                      |                        |              |
| ۱۶:۱ (پالمیتولئیک)      | ۰                    | ۰/۴                    | ۰/۵          |
| ۱۸:۱ (اولئیک)           | ۱۲/۳                 | ۵۸/۹                   | ۵۶/۹         |
| ۲۰:۱ (اکوزنوییک)        | ۵/۸                  | ۱/۵                    | ۱/۵          |
| ۲۲:۱ (اروسیک)           | ۵۹/۴                 | ۱/۱                    | ۰            |
| ۲۴:۱ (نروئیک)           | ۱/۶                  | ۰/۲                    | ۰/۳          |
| ۱۸:۲ (لینولئیک)         | ۱۲/۷                 | ۲۱/۸                   | ۲۳/۸         |
| ۱۸:۳ (لینولنیک)         | ۷/۶                  | ۱۰/۵                   | ۱۰/۱         |

ماخذ: (شیرانی راد و دهشیری، ۱۳۸۱)

## ۱-۲-۱ تاریخچه کشت کلزا در ایران و جهان

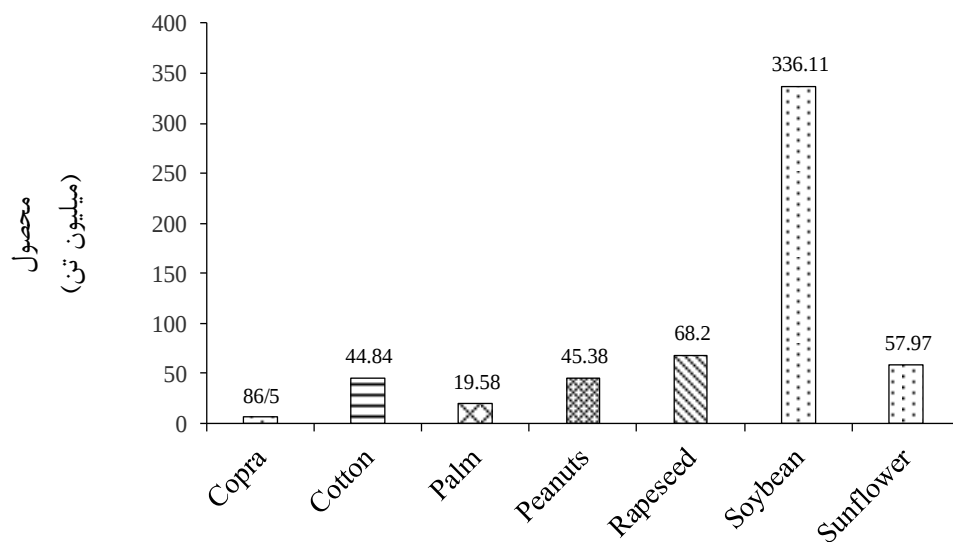
در بین دانه های روغنی، کلزا اولویت خاصی برخوردار بوده و با توجه به نیاز کشور سطح زیرکشت آن در حال توسعه است. ارقام و تاریخ های کاشت مناسب کلزا با توجه به سازگاری کلزا در اغلب مناطق ایران موفقیت آمیز بوده است و با توجه به شرایط اقلیمی در ایران این گیاه می تواند به عنوان کشاورزی اصلی و ثانویه نیز مطرح باشد. کشت کلزا به صورت آزمایشی از اواخر دهه ۴۰ شمسی آغاز گردید (عزیزی و همکاران، ۱۳۷۸). به لحاظ سازگاری اقلیمی ارقام کلزا و امکان تولید گسترده آنها، بذر کلزا از کشورهای مختلف جهان تهیه و در مناطق مختلفی از کشور کشت و بررسی شد. در طی این سال ها از کشت کلزای اصلاح شده در نقاط مختلف ایران، نتایج نشان دهنده موفقیت در توسعه

کشت کلزا بوده که می‌تواند در کاهش میزان واردات در زمینه روغن گیاهی موثر باشد. به منظور کاهش وابستگی کشور به دانه‌های روغنی، وزارت جهاد کشاورزی طرح ۱۰ ساله‌ای را تهیه کرد که با اجرای آن ۷۰ درصد نیاز کشور به دانه‌های روغنی در داخل کشور تامین خواهد شد. برنامه کشت کلزا در سال زراعی ۹۹-۱۳۹۸ برابر برنامه ابلاغی ۶۱۶ هزار هکتار بود. وزارت جهاد کشاورزی استان‌های گلستان، خوزستان، مازندران، ایلام، کرمانشاه و اردبیل به عنوان عمده تولیدکنندگان برتر در تولید کلزا در سال ۹۸-۹۷ ذکر کرده است (وزارت جهاد کشاورزی، ۱۳۹۹)

کلزا سالیان طولانی در اروپا کشت شد (قرن ۱۳) ولی کشت آن در آسیا به هزاران سال قبل بر می‌گردد. در آسیا برای تغذیه انسان و در اروپا به عنوان منبعی برای روغن چراغ استفاده می‌شد. کشور کانادا مساحت زیادی از اراضی خود را به کشت این گیاه اختصاص داد و رفته رفته میزان آن به دلیل جایگزینی دیزل به جای بخار کاهش یافت. اصلاح اولین کلزای روغنی با مقدار پایین اروسیک اسید در کانادا در سال ۱۹۵۷ صورت گرفت. با تولید بیشتر این محصول هزاران هکتار از اراضی کانادا به کشت این گیاه اختصاص یافت. رقم‌های اصلاح شده با اروسیک اسید پایین که در کانادا مورد کشت قرار گرفتند، شامل ارقام میداس (Midas)، اسپان (Span)، و تورچ (Torch) بودند. در سال ۱۹۷۱ اولین واریته با اسید اروسیک کم رقم اسپان (Span) و سه سال بعد اولین رقم دو صفر کلزا با مقدار اندک اروسیک اسید و گلوکوزینولات رقم تاور (Tower) بودند که به عنوان اولین واریته‌های کانولا معرفی شدند. نام کانولا در سال ۱۹۷۸ توسط انجمن روغن‌گیری غرب کانادا به ثبت رسیده و امروزه نیز برای توصیف کلزایی که دارای مقادیر اندک اروسیک اسید و گلوکوزینولات است، استفاده می‌گردد (دهشیری، ۱۳۷۸)

روغن کلزا سومین روغن گیاهی پرمصرف در سراسر جهان محسوب می‌شود (فلاکلار و همکاران، ۲۰۱۵). کشورهای اصلی تولید کننده کلزا شامل چین، کانادا و هند می‌باشد (اسکوبار و همکاران، ۲۰۱۰). اروپا با ۳۴ درصد و پس از آن آسیا با ۳۰/۷ درصد، آمریکا با ۲۹/۹ درصد، اقیانوسیه

با ۵/۲ درصد و آفریقا با ۰/۳ درصد به ترتیب بیشترین متوسط عملکرد دانه در جهان می‌باشد (فادو، ۲۰۱۸). میزان تولید جهانی کلزا در سال ۲۰۱۹-۲۰۲۰ معادل ۶۸/۲ میلیون تن بود (شکل ۱-۱).



شکل ۱-۱- تولید جهانی دانه‌های روغنی (میلیون تن) در سال ۲۰۱۹-۲۰۲۰  
(مأخذ: [www.statista.com](http://www.statista.com))

## ۱-۲-۲ گیاه شناسی کلزا

### ۱-۲-۲-۱ ریشه

کلزا دارای یک ریشه اصلی عمودی و بلند و به شکل دوک می‌باشد (شیرانی‌راد و دهشیری، ۱۳۸۱). سیستم ریشه کلزا سطحی است (هولاند، ۱۹۹۹)، که اثرات مفیدی روی ساختمان خاک و نفوذ رطوبت دارد (نورتون و همکاران، ۱۹۹۹).

### ۱-۲-۲-۲ ساقه

ساقه کلزا از شاخه‌های فراوانی منشعب می‌شود. ساقه به طور معمول گرد، توپر، راست و سبز بوده و در زمان رسیدگی فیزیولوژیک<sup>۱</sup> رنگ آن کاهی می‌شود (آلیاری و همکاران، ۱۳۷۹). ارتفاع آن بین ۸۰ تا ۱۵۰ سانتی‌متر است (عاشوری، ۱۳۸۰).

### ۱-۲-۲-۳ برگ

برگ‌های کلزا به سه شکل چسبیده ساقه آغوش، چسبیده معمولی و دارای دم‌برگ است (انوری، ۱۳۷۶؛ شیرانی‌راد و دهشیری، ۱۳۸۱). تعداد برگ‌ها بر روی ساقه اصلی وابسته به نوع واریته بوده که در بوته‌های تیپ بهاره پائیزه متغیر است (آلیاری و همکاران، ۱۳۷۹).

### ۱-۲-۲-۴ گل

گل‌ها دو جنسی و به شکل صلیبی دارای چهار کاسبرگ، چهار گلبرگ، شش پرچم که دو پرچم آن کوتاه تر می‌باشند و مادگی آن دوبرچه‌ای است (بیلی، ۱۹۷۶). کلزا گیاهی خودگشن<sup>۱</sup> است (لگر،

---

<sup>۱</sup> . Physiological maturity

۲۰۰۵؛ هاسکن و دایتزفلیستر، ۲۰۰۷). دگرگشتی نیز توسط باد و حشرات در شرایط مزرعه از طریق تماس فیزیکی اتفاق می‌افتد (ایستهام و سوئیت، ۲۰۰۲؛ هاسکن و دایتزفلیستر، ۲۰۰۷).

#### ۱-۲-۲-۵ میوه

میوه کلزا، خورجینی<sup>۲</sup> فاقد کرک بوده، که طول آن پنج تا ۱۰ سانتی‌متر است. ممکن است ۱۵ تا ۴۰ عدد دانه در هر خورجین تشکیل شود. قسمت بالایی هر خورجین به طول ۳/۵ تا ۵ میلی‌متر معمولاً بدون بذر است (کالیهان و همکاران، ۲۰۰۰؛ گلدن و همکاران، ۲۰۰۸؛ OECD، ۲۰۱۲). پر شدن خورجین‌ها بین ۳۵ تا ۴۵ روز طول می‌کشد (انجمن کلزای کانادا، ۲۰۱۴).

#### ۱-۲-۲-۶ بذر

تشکیل بذر در یک سوم انتهایی ساقه اصلی شروع می‌شود و دانه‌ها شفاف و سبز هستند. در زمان رسیدگی، بذرها کروی و قرمز مایل به قهوه‌ای، قهوه‌ای یا سیاه با قطر ۱/۸ تا ۲/۷ میلی‌متر هستند (کولتون و سایکس، ۱۹۹۲؛ گلدن و همکاران، ۲۰۰۸).

#### ۱-۲-۲-۷ ارقام کلزا

ارقام یک صفر: وارسته‌هایی حاوی کمتر از ۵ درصد اروسیک اسید در روغن و تا ۱۰۰ تا ۲۰۵ میکرومول گلوکوزینولات در هر گرم کنجاله

ارقام دو صفر: تکامل یافته ارقام یک صفر و حاوی کمتر از دو درصد اروسیک اسید در روغن و ۱۸ تا ۳۰ میکرومول گلوکوزینولات در هر گرم کنجاله

ارقام سه صفر: نوع اصلاح شده ارقام شلغم روغنی که اصطلاحاً به آنها (Candle) گفته می‌شود و دارای حداقل میزان اروسیک اسید، گلوکوزینولات و فیبر

## ۱-۲-۳ فنولوژی کلزا

از اوایل دهه ۷۰ میلادی در کانادا تحقیقات در مورد رشد و نمو کلزا شروع شد (حجازی، ۱۳۷۷). کاربرد کلیدهای عددی در تحقیقات برای شرح مراحل نمو کلزا، به دلیل تکرارپذیری و ارتباط بین دانشمندان و تولید تجارتي آن لازم به نظر می‌رسد (شات، ۱۹۸۲). هارپر و برکنکامپ (۱۹۷۵) این روش را برای اولین بار بکار گرفتند. مراحل نمو کلزا به شش مرحله قبل از سبز شدن، گیاهچه، روزت، غنچه، گل و رسیدگی، با کد صفر تا پنج تقسیم گردید (زواره، ۱۳۷۹؛ ولدیانی، ۱۳۸۲). این روش توسط کشاورزان و برخی پژوهشگران به کار گرفته شده است (وایس، ۱۹۸۳).

حدود ده سال بعد روش مفیدتری جهت کد کردن مراحل نمو کلزا توسط سیلواستر و مکپیس (۱۹۸۴) ارائه شد، که دارای هفت مرحله اصلی با کد صفر الی شش برای نمو کلزا بود که به ترتیب شامل: جوانه زنی و سبز شدن، تولید برگ، طول شدن ساقه<sup>۱</sup>، نمو جوانه گل، گل دهی، نمو خورجین و نمو دانه بود. مراحل اصلی نمو کلزا پیوسته بوده و ممکن است مرحله طول شدن ساقه و نمو جوانه‌های گل با یکدیگر تداخل داشته باشند، بنابراین از کدهای عددی برای ثبت کردن در حین انجام آزمایش‌ها بیشتر استفاده می‌شود و بدون تعاریف مربوطه نباید در ارتباطات شفاهی یا نوشتاری از آنها استفاده شود (زواره و امام، ۱۳۷۹).

شناخت مراحل نموی فرعی کلزا فقط ماهیت علمی محض دارد و در عرصه کشاورزی برای کشاورزان قابل استفاده نیست، لذا محققان طی سال‌های اخیر با بکارگیری کلیدها، بیشترین سرمایه‌گذاری را بر روی مراحل نموی اصلی و فرعی کلزا قرار داده‌اند (اوزر و اورال، ۱۹۹۷؛ بایدر و یوس، ۱۹۹۶).

---

<sup>1</sup> Stem elongation

انجمن کلزای کانادا آخرین روش کدگذاری را اعمال کرد و که براساس آن مراحل رشد و نمو کلزا را به شش مرحله اصلی جوانه‌زنی، گیاهچه، روزت، غنچه‌دهی، گل‌دهی و مرحله رسیدگی با کدهای صفر تا پنج تقسیم شد (ولدیان، ۱۳۸۲). در این روش مرحله اصلی تشکیل خورجین و پر شدن دانه که دانستن آن در مزارع برای انجام آبیاری‌های متناوب اهمیت دارد، به عنوان مرحله فرعی ذکر شده و درواقع زیر مجموعه‌ای از مرحله اصلی گل‌دهی محسوب شده است و یا تشخیص مرحله ساقه رفتن و آغاز رشد مجدد توسط کشاورز برای توزیع اولین نوبت کود سرک ازته نیز بسیار مهم است، که در تقسیم‌بندی‌های گذشته جزء مراحل اصلی بوده و در سیستم جدید، جزئی از مرحله اصلی غنچه‌دهی به حساب می‌آید. لذا براساس تعاریف صورت گرفته این مراحل به عنوان مراحل نموی کاربردی مطرح می‌باشند (بوتیر و مورگان، ۱۹۹۲؛ هادگسون، ۱۹۷۸).

در جدول ۱-۲ مراحل رشد و نمو کلزا (انجمن کلزای کانادا، ۱۹۹۸) درج گردیده است.

## ۴-۲-۱ سازگاری و پراکندگی کلزا

کلزا متناسب با اقلیم معتدل و مرطوب است. عکس العمل گیاه به فتوپریود به دلیل روز بلند بودن آن منجر به ساقه رفتن و نیز کوتاه شدن دوره رشد در آن می‌گردد. کوتاه شدن طول روز در پائیز باعث می‌شود که کلزا در مرحله روزت باقی مانده و با افزایش تابش نور، ساقه رفتن و گل‌دهی گیاه در بهار بهبود می‌یابد (حجازی، ۱۳۷۹).

کلزا دامنه فتوپریود بسیار متنوعی دارد، به طوری که در دامنه ۱۰ تا ۲۴ ساعت روشنائی می‌تواند رشد و نمو داشته باشد. همانند غلات سردسیری در محدوده دو تا چهار درجه سانتی‌گراد نیاز حرارتی کلزا برای جوانه زنی می‌باشد. برای ورنالیزاسیون دمای مناسب یک تا چهار درجه سانتی‌گراد بوده که مدت زمان آن ۲۰ تا ۶۰ روز است (آلیاری و همکاران، ۱۳۷۹).

درجه حرارت پایه برای این گیاه معمولاً پنج درجه سانتی گراد در نظر گرفته می‌شود. درجه حرارت مطلوب برای رشد و نمو کلزا، ۲۵ تا ۳۰ درجه سانتی گراد می‌باشد. البته این گیاه قادر است برای دوره‌های کوتاه، دمای ۴۰ درجه سانتی گراد را نیز تحمل کند (شیرانی‌راد و دهشیری، ۱۳۸۱). اگر کلزا در وضعیت مناسب روزت با ساقه کوتاه زمستان‌گذرانی کند، می‌تواند سرما را بدون پوشش برف تا ۱۵ درجه زیر صفر و با پوشش برف تا ۲۰ درجه زیر صفر به مدت کوتاهی تحمل کند. البته ارقام بهاره کلزا در برابر سرمای دیررس حساس‌تر هستند. حداکثر مقاومت کلزا به منظور زمستان‌گذرانی در مرحله ی هشت تا ۱۰ برگی روزت حاصل می‌شود. از این رو تاریخ کاشت کلزا در مناطق مختلف از اهمیت ویژه ای برخوردار می‌باشد (آلیاری و همکاران، ۱۳۷۹).

کلزا در مراحل حساس مانند: مرحله جوانه‌زدن، ساقه‌رفتن، گل‌دهی و به خصوص در زمین‌های سبک با تأمین آب، محصول بیشتری تولید می‌کند. بارندگی زیاد نیز به گیاه آسیب می‌رساند. تنش آبی در زمان کشت کلزا، باعث عقب افتادن جوانه زدن و تغییراتی در مراحل مختلف رشد و نمو می‌شود. تنش آبی در مرحله ساقه‌رفتن و گل‌دهی منجر به پژمردگی فیزیولوژیکی غنچه می‌شود. به‌طوری‌که غنچه‌ها زرد مایل به خاکستری رنگ، خشک و معمولاً بدون خورجین خواهند بود. همچنین کمبود آب باعث افت تولید خورجین و دانه می‌شود (حجازی، ۱۳۷۹). کلزا به مقدار بارندگی در حدود ۴۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر در طول دوره گل‌دهی نیاز دارد. اگر بارندگی بیش از ۷۰۰ میلی‌متر باشد آسیب رسان خواهد بود، زیرا باعث رشد بیماری‌های قارچی می‌شود (عاشوری، ۱۳۸۰). برای تولید حداکثر ماده خشک و شاخص برداشت مناسب تأمین ۷۰ تا ۷۵ درصد کل آب مصرفی گیاه بعد از گل‌دهی لازم است. ورس کلزا در خاک‌هایی که رطوبت آن زیاد است، رخ می‌دهد. تحقیقات نشان داده است که کلزا در رطوبت خاکی حدود ۱۷۰ میلی‌متر رشد و نمو کاملی داشتند. کلزا از زمان کاشت تا زمان گل‌دهی کامل به آبیاری احتیاج ندارند، اگر میزان رطوبت خاک به ۲۵۰ میلی‌متر برسد.

جدول ۱-۲- مراحل فنولوژی کلزا

| کد  | نام مرحله       | مراحل فرعی                                                                   |
|-----|-----------------|------------------------------------------------------------------------------|
| ۰   | مرحله جوانه زنی | .                                                                            |
| ۱   | مرحله گیاهچه    |                                                                              |
| ۲   | مرحله روزت      |                                                                              |
| ۲-۱ |                 | نخستین برگ حقیقی گسترش می‌یابد.                                              |
| ۲-۲ |                 | دومین برگ حقیقی گسترش می‌یابد.                                               |
| ۲-۳ |                 | سومین برگ حقیقی گسترش می‌یابد.                                               |
| ۳-۳ | مرحله ساقه دهی  | :                                                                            |
| :   |                 | :                                                                            |
| :   |                 | :                                                                            |
| ۳   | مرحله غنچه دهی  | .                                                                            |
| ۳-۱ |                 | گل آذین در وسط روزت قابل رویت می‌شود.                                        |
| ۳-۲ |                 | گل آذین به بالاتر از سطح روزت رشد می‌کند.                                    |
| ۳-۳ |                 | غنچه‌های پائینی به زردی می‌گرایند.                                           |
| ۴   | مرحله گل دهی    | .                                                                            |
| ۴-۱ |                 | نخستین گل می‌شکفت.                                                           |
| ۴-۲ |                 | تعداد زیادی گل می‌شکفت و غلاف‌های پائینی باز می‌شوند.                        |
| ۴-۳ |                 | غلاف‌های پائینی شروع به دانه بندی می‌کنند.                                   |
| ۴-۴ |                 | گلدهی به پایان می‌رسد و دانه‌های غلاف‌های پائینی متورم می‌شوند.              |
| ۵   | مرحله رسیدگی    | .                                                                            |
| ۵-۱ |                 | دانه‌های غلاف‌های پائینی به حد نهایی رشد کرده و حالت شفاف دارند.             |
| ۵-۲ |                 | دانه‌های غلاف‌های پائینی سبز رنگند.                                          |
| ۵-۳ |                 | دانه‌های غلاف‌های پائینی زرد متمایل به قهوه ای یا سبز متمایل به زرد شده اند. |
| ۵-۴ |                 | دانه‌های غلاف‌های پائینی زرد یا قهوه ای شده اند.                             |
| ۵-۵ |                 | دانه‌های کلیه غلاف‌ها قهوه ای شده و بوته می‌میرد.                            |

ماخذ: (شیرانی‌راد و دهشیری، ۱۳۸۱)

این گیاه روغنی باه دلیل داشتن ریشه عمیق، به خاک‌های غنی از آهک، مواد غذایی و عمیق با رطوبت خوب احتیاج دارد (حجازی، ۱۳۷۹).

کلزا در خاک‌های رسی نسبتاً سنگین تا خاک‌های شنی سبک قابل کشت است. برای این گیاه که دارای بذر کوچک است زمین‌هایی که پس از باران سله می‌بندند مناسب نیستند، چون و گیاهچه نمی‌تواند از خاک خارج شود. ویژگی‌های اصلی خاک مناسب برای کلزا آن است که آب به سهولت از آن عبور نماید، زیرا مردابی شدن برای رشد و نمو گیاه مضر است. گونه‌های *Brassica* به دامنه گسترده‌ای از خاک‌ها مقاومند. خاک در حالت ایده آل و مناسب باید دارای ساختمان خوب، زهکشی مناسب، دارای قابلیت نگهداری رطوبت و عمیق باشد. کلزا می‌تواند pH بین پنج تا هشت را تحمل کند. ایده‌آل‌ترین اسیدیته خاک در حدود ۶/۵ بوده که عناصر به سهولت جذب می‌شوند. کلزا در برابر شوری متحمل است و خاک‌هایی را که دارای هدایت الکتریکی (Ec) چهار تا هشت دسی‌زیمنس بر متر باشد برای آن قابل تحمل است (حجازی، ۱۳۷۹).

## ۱-۲-۵ مزیت‌های نسبی کلزا نسبت به سایر دانه‌های روغنی

کلزای زمستانه و بهاره اصلاح شده در زراعت مورد کشت قرار می‌گیرند. پتانسیل عملکرد تیپ زمستانه ۲۰ تا ۳۰ درصد بیشتر از تیپ بهاره در شرایط مطلوب است. در مناطقی که تیپ‌های زمستانه در پاییز و تیپ‌های بهاره در بهار کشت می‌شود، تیپ زمستانه حدود یک ماه زودتر از تیپ بهاره گل می‌دهد، اما به علت گرمای تابستان فقط یک هفته زودتر برداشت می‌شود. این حالت منجر به کاهش دوره پر شدن دانه شده و پتانسیل عملکرد تیپ بهاره کلزا را در مناطق سرد کاهش می‌دهد. واریته‌های بهاره کلزا در کشت بهاره فشار مضاعفی را از جانب علف‌های هرز بهاره و حشرات مضر تحمل می‌کنند، به همین دلیل تولید و کشت تیپ‌های بهاره در اکثر نقاط توصیه نمی‌شود و در ایران بر حسب اقلیم‌های مختلف تیپ‌های بهاره و زمستانه جهت کشت پاییز توصیه می‌شوند. از جمله مزیت‌های نسبی کلزا می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد:

- ✓ روغن کلزا با داشتن نزدیک به ۶۰ درصد اسید اولئیک بهتر از اغلب روغن‌های نباتی است.
- ✓ کیفیت روغن آن به خصوص در ارقام جدید بسیار مطلوب است.
- ✓ در زراعت کلزا با مصرف آب کمتر، تولید روغن بیشتر ممکن می‌شود.
- ✓ قابلیت کشت در پاییز و عدم رقابت با محصولات زراعی بهاره و تابستانه وجود دارد.
- ✓ امکان کشت در شرایط دیم و در زمین‌های آیش میسر است. قابلیت کاشت، داشت و برداشت با ادوات زراعی گندم و جو و عدم نیاز به ماشین‌های زراعی خاص و سرمایه‌گذاری جدید مقدور می‌باشد.
- ✓ داشتن درآمد بیشتر نسبت به زراعت بعضی از غلات برای کشاورزان ممکن می‌شود.
- ✓ امکان جلوگیری از فرسایش خاک در فصل بارندگی بوجود می‌آید.
- ✓ امکان جلوگیری از شسته شدن ازت خاک در فصل بارندگی بوجود می‌آید.
- ✓ ایجاد اشتغال در فصل زمستان و جلوگیری از مهاجرت فصلی روستائیان بوجود می‌آید.
- ✓ مصرف روغن کلزا از امراض قلبی، ورم مفاصل، روماتیت و غیره جلوگیری می‌کند.
- ✓ تحمل‌پذیری کلزا نسبت به شوری زیاد و بیش از اغلب دانه‌های روغنی است.
- ✓ کنجاله کلزا با داشتن حدود ۳۸ درصد پروتئین یکی از منابع پروتئین گیاهی است.
- ✓ بقایای کلزا پس از برداشت محصول، علوفه مناسبی جهت تعلیف دام می‌باشد.
- ✓ کلزا در دوره گلدهی منبع تغذیه مهمی برای زنبور و زمینه مناسبی برای پرورش زنبور عسل و تولید عسل می‌باشد.

## ۱-۳ تنش خشکی

خشکی مهم‌ترین عامل محدود کننده در رشد گیاهان و تولید محصولات کشاورزی در سراسر جهان به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک است (شیرانی‌راد و زندی، ۲۰۱۴؛ یارنیا و همکاران، ۲۰۱۱). کاهش عملکرد محصولات زراعی تحت تأثیر تنش غیرزنده بین ۵۱ تا ۸۲٪ تخمین زده می‌شود (کوک و لیشمن، ۲۰۱۶). حدود ۵۰ درصد زمین‌های آبی دنیا که حداقل می‌توانند دو برابر کارآمدتر از زمین‌های دیم باشند و قادرند یک سوم غذای دنیا را تهیه کنند، تحت تنش‌های غیرزنده مانند شوری و خشکی قرار دارند (یانگ کای و اشمیده‌التر، ۲۰۰۵).

با در نظر گرفتن وضعیت کمبود شدید آب در کشور و به لحاظ مشخص بودن منابع آبی، افزایش نرخ جمعیت و عدم توجه به مدیریت منابع آبی، در صورت عدم تصمیم‌گیری در خصوص سیاست‌های مناسب مدیریت منابع آب در هر دو جنبه عرضه و تقاضا، شدت یافتن شرایط نامطلوب منابع آبی در ایران و اثرگذاری شاخص‌های مربوط به امنیت و اقتصاد امری اجتناب ناپذیر خواهد بود.

ایران در کمربند خشک و نیمه خشک دنیا واقع گردیده است و جزء کشورهای با محدودیت منابع آب بشمار می‌آید. بررسی وضعیت بارندگی کشور نشان می‌دهد که روند بلند مدت بارندگی سیر نزولی داشته و میزان بارندگی در سال‌های اخیر کاهش یافته است و حجم آب موجود در مخازن سدها تنها ۳۸ درصد از کل مخازن را شامل می‌شود، که زمینه‌ای برای بروز خشکسالی‌های شدید در بخش‌هایی از کشور است. خشکسالی پدیده‌ای طبیعی است، اما ابعاد آسیب رسان آن بسته به موقعیت جغرافیایی متفاوت است. خشکسالی زمینه‌پذیری بیشتر کشور از منابع آب را فراهم می‌کند.

با توجه به مساحت کل ایران و کاهش در دسترس بودن منابع آبی لازم است تمهیداتی شایسته در خصوص استفاده بهینه از آب در بخش کشاورزی صورت پذیرد. با بکارگیری رژیم‌های کم آبیاری با هدف افزایش راندمان مصرف آب می‌توان به یک مدیریت آب در مزرعه درجهت افزایش سطح زیر

کشت و اصلاح الگوی کشت دست یافت. بهترین استراتژی سودمند اقتصادی در وضعیت محدود بودن آبیاری و با هدف استفاده بهینه از واحد حجم آب مصرفی کم آبیاری می‌باشد (جلیلیان و همکاران، ۱۳۸۰).

### ۱-۳-۱ مکانسیم‌های سازگاری گیاهان به خشکی

گیاهان برای مقابله با تنش خشکی استراتژی‌های مختلف مورفوفیزیولوژیکی و بیوشیمیایی را در خود تکامل داده‌اند (ایجاز و همکاران، ۲۰۱۷). انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی براساس ویژگی‌های زراعی و فیزیولوژیکی گیاهان که در تحمل به خشکی نقش دارند، امکان پذیر است. انواع خشکی توسط عوامل مختلفی می‌تواند ایجاد شود که شامل: کاهش رطوبت نسبی هوا، کمبود آب، گرما و یخبندان و شوری می‌باشند. تنوع خشکی باعث رخ دادن مکانسیم‌های مختلف تحمل در سطح‌های مختلف موجودات زنده می‌گردد (فتیحی و تاری، ۲۰۱۶).

توانایی یک گیاه از نظر بقاء، رشد و تولید دانه زمانی که قسمتی از چرخه زندگی آن تحت تنش آبی واقع شود، متحمل به خشکی نامیده می‌شود. گیاه متحمل به خشکی قادر است بدون کاهش فتوسنتز، تعرق کمتری داشته باشد. آب به عنوان یک محیط برای متابولیسم می‌باشد و بسیاری از گازها، نمک‌ها و ترکیب‌های آلی در آب محلول هستند. آب یک حلال شیمیایی در فرآیندهای فتوسنتز و تنفس محسوب می‌شود. کاهش آب در بستر رشد ریشه، منجر به بسته شدن سلول روزنه‌ای و محدودیت تبادل گازی  $CO_2$  می‌گردد. از هم گسیختگی متابولیسم و ساختار سلولی به علت از دست دادن زیاد آب منجر به توقف اثرات کاتالیزوری آنزیم‌ها می‌شود (اسمیرنوف، ۱۹۹۳). وجود آب برای رشد و افزایش اندازه سلول گیاهی از الزامات است. مهم‌ترین فرآیند حرکت آب در سلول و اندام‌های گیاه فرایند اسمزی می‌باشد که در آن غشاء پلاسمایی نقش مهمی دارد. اگر غشاء پلاسمایی به دلیل عوامل بیرونی مانند: یخ زدگی یا عوامل شیمیایی آسیب ببیند، انتقال آب قطع شده و سلول از بین می‌رود.

تنش خشکی باعث جلوگیری از فتوسنتز و متابولیسم و همچنین مرگ سلولی و گیاه می شود (جلیل و همکاران، ۲۰۰۸). حفظ ساختمان آنزیم‌ها و تسهیل فعالیت کاتالیزوری آنها وابسته به جذب و وجود آب بوده که باعث خنثی‌سازی و جذب بار الکتریکی مولکول‌های کلونیدی می شود. تعرق باعث خاصیت خنک‌کنندگی گیاه شده که این مطلب کاملاً به اثبات رسیده است. در بافت‌های گیاهی کاهش نوسانات درجه حرارت، وظیفه آب است. بیشتر از هر عامل دیگر توزیع گیاهان در سطح زمین با موجودیت آب تنظیم می‌شود.

گیاهان از طریق مکانسیم‌های مختلفی در برابر خشکی مقاومت می‌کنند. محققان فیزیولوژی و اصلاح نباتات برای مقاومت نباتات با محیط خشک از پنج واژه زیر استفاده می‌کنند (سعیدیان، ۱۳۷۵).

### ۱-۳-۱ مقاومت به خشکی<sup>۱</sup>

توانایی یک گیاه برای تداوم رشد و تولید عملکرد در حد رضایت بخش و در شرایط محدودیت ذخیره آب و یا تحت کمبودهای متوالی است از نظر تکامل، مقاومت به خشکی عبارت است از توان زنده ماندن از نسلی به نسل دیگر تحت شرایط محدودیت آبیاری.

### ۱-۳-۲ گریز از خشکی<sup>۲</sup>

فرار از خشکی بنا به تعریف توانایی گیاه زراعی برای تکمیل سیکل زندگی خود قبل از وقوع کمبود آب اطلاق می‌گردد. استفاده از این مکانیسم بیشتر در مناطقی که شرایط خشکی در اواخر فصل رشد بروز می‌کند اهمیت دارد.

### ۱-۳-۳ تحمل خشکی<sup>۳</sup>

---

<sup>1</sup> Drought resistance

<sup>2</sup> Drought escape

<sup>3</sup> Drought tolerance

تحمل خشکی به قابلیت گیاه برای تحمل نوعی از کم آبی که به تدریج بروز کرده و با پتانسیل آبی گیاه بطور موازی ادامه می‌یابد، گفته می‌شود در مکانیسم تحمل سلول‌های گیاه با کمبود آب مواجه می‌شوند ولی چون پروتوپلاسم آنها در برابر هیدراسیون متحمل می‌باشند گیاه تغییرات و صدمه‌های ناشی از تنش را تحمل نموده و یا آنها را به حداقل می‌رساند.

#### ۱-۳-۱ اجتناب از خشکی<sup>۱</sup>

توانایی یک گیاه در نگهداری پتانسیل بالای آب در طی مدت خشکی را اجتناب از خشکی می‌گویند به بیان دیگر توانایی نبات در نگهداری حالت‌های آزاد آب در نسوج خود در طول دوره خشکی گفته می‌شود.

#### ۱-۳-۱-۵ بهبود از خشکی<sup>۲</sup>

توانایی گیاه برای از سرگیری رشد و جبران عملکرد با حداقل خسارت بعد از اتمام دوره تنش را بهبود از خشکی می‌گویند.

گیاه توسط سرعت رشد بیشتر، زودرسی و گلدهی زودتر می‌تواند از ساز و کار فرار از خشکی بهره‌برد، که در این صورت گیاه زنده مانده اما قادر نیست وارد مرحله زایشی شود و عملکردی تولید کند (گوپتا و همکاران، ۱۹۹۵). که در اینجا به اهمیت اجتناب از خشکی می‌توان پی برد، بدین مفهوم که گیاه با نگهداری حالت آماس از طریق تنظیم سطح برگ یا تغییر در سیستم ریشه می‌تواند دوران تنش خشکی را تحمل نماید و از این ساز و کارهای اجتناب و تحمل بهره‌مند گردد (گوپتا و همکاران، ۱۹۹۵).

### ۱-۴ سیلیکون

---

<sup>1</sup> Drought avoidance

<sup>2</sup> Drought recovery

سیلیکون (Si) دومین عنصر فراوان بعد از اکسیژن در خاک است. همه گیاهان ریشه‌ای در خاک حاوی مقداری سیلیکون در سلول‌ها و بافت‌های خود هستند (آل، ۲۰۱۴) و رسوب زیاد آن در بافت‌ها باعث افزایش استحکام در آن‌ها می‌گردد (نیتیراجان و همکاران، ۲۰۰۹). هر چند درباره نقش سیلیکون در زیست‌شناسی، اطلاعات زیادی در دست نیست (جمیل و همکاران، ۲۰۰۷) و به عنوان عنصر ضروری برای اکثر گیاهان شناخته نشده است، ولی سیلیکون نقش مهمی را در گیاهان زراعی بازی می‌کند (اپستاین و بلوم، ۲۰۰۵). بنابراین سیلیکون به عنوان یک عنصر شبه ضروری که اثرات مثبت بر روی رشد، نمو و عملکرد گیاهان زراعی به منظور کاهش تأثیر تنش خشکی دارد، تعیین شده است (اعتصامیا و جی‌اُنگ، ۲۰۱۸؛ اینجی و همکاران، ۲۰۰۸؛ بای‌بوردی، ۲۰۱۴؛ پی و همکاران، ۲۰۱۰؛ کت و اُوا، ۱۹۹۰؛ ما و همکاران، ۲۰۰۴؛ نولا و همکاران، ۲۰۱۲). از مزایای سیلیکون برای گیاهانی که مورد تنش واقع شده‌اند در جهت منافع کشاورزی استفاده می‌شود (دتنف و همکاران، ۲۰۰۱).

## ۱-۴-۱ تاریخچه کاربرد سیلیکون

سیلیکون عمدتاً به صورت آلومینوسیلیکات توزیع می‌شود که به راحتی توسط گیاهان قابل استفاده نیست، اما گیاهان سیلیکون را تنها به صورت یک اسیدمونوسیلیسیک جذب می‌کنند (مارافون و اندرس، ۲۰۱۳). سیلیکون برای گیاهان مفید است، مانند محافظت در برابر بیماری‌ها، حمله حشرات، تقویت کننده مواد مغذی و محافظت از آنها در شرایط نامساعد از جمله خشکی، شوری یا سمیت فلزات سنگین (دبونا و همکاران، ۲۰۱۷؛ طیب و همکاران، ۲۰۱۸).

کوچرا و نیکلاس (۲۰۱۸) عملکرد سیلیکون در زیست‌شناسی گیاهی را این گونه عنوان کردند که "آیا اسیدسیلیسیک یک ماده ضروری برای گیاهان است؟ آیا در فرآیندهای تغذیه‌ای شرکت می‌کند و چه ارتباطی بین جذب اسید سیلیسیک و عمر گیاه وجود دارد؟" (لوی و ریمن، ۱۹۶۹). در قرن بیستم، چندین آزمایش بر روی سیلیکون انجام شد تا نقش مفید آن را در کشاورزی نشان دهد.

برای اولین بار در جهان، مزارع برنج در ژاپن در سال ۱۹۵۵ با سیلیکون تیمار شدند (تاکاهاشی و همکاران، ۱۹۹۰). کودهای سیلیکون معمولاً حاوی pH خنثی یا کمی قلیایی هستند که خاصیت خنثی کنندگی بر خاک‌های اسیدی دارد (ساوانت و همکاران، ۱۹۹۹). انواع مختلفی از کودهای سیلیکون در این زمینه به کار برده می‌شود که معمولاً به شکل جامد و همچنین مایع مانند سیلیکات کلسیم، سیلیکات‌های ولستونیت کلسیم و منیزیم، سیلیکات پتاسیم و سیلیکات سدیم هستند.

## ۱-۴-۲ جذب و تجمع سیلیکون در گیاهان

گیاهان در قابلیت جذب سیلیکون متفاوت می‌باشند. بعضی از گیاهان قادرند سیلیکون را بیشتر در برگ‌های خود جمع کنند و این‌ها که بیش از ۱/۵ درصد از زیست توده خشک کل خود را دارند به عنوان انباشتگر شناخته می‌شوند. گیاهان حاوی سطح سیلیکون کمتر از ۰/۵ درصد در برگ به عنوان غیرانباشتگر در نظر گرفته می‌شوند (مارافون و اندرس، ۲۰۱۳). تغییر غلظت سیلیکون در گیاهان به قابلیت جذب سیلیکون و بارگذاری آن از آوند ریشه نسبت داده می‌شود (ما و همکاران، ۲۰۰۱ b).

غشای پلاسمایی در سلول‌های ریشه گیاه ممکن است مسیری را برای جذب  $H_4SiO_4$  مونومری بدون بار توسط انتشار فراهم کند. از آنجایی که ضریب نفوذپذیری  $H_4SiO_4$  در سراسر غشای پلاسمایی  $10^{-10}$  متربرثانیه است (راون، ۲۰۰۱)، بنابراین تعیین مقدار سیلیکون در شرایط آزمایشی آسان نیست (تمای و ما، ۲۰۰۳). انتقال فعال و غیرفعال در جذب و انتقال سیلیکون از محیط رشد تا بافت‌های آوندچوبی نقش دارند (میتانی و همکاران، ۲۰۰۵). یک انتقال‌دهنده اسیدسیلیسیک با وابستگی کم، منجر به انتقال سیلیکون از محیط ریشه به سلول‌های پوست می‌شود. مطالعات بر روی جذب سیلیکون در برنج، گوجه فرنگی و خیار نشان دادند که ظرفیت ناقل‌های موجود در غشای پلاسمایی مسئول جذب متغیر سیلیکون می‌باشد (میتانی و همکاران، ۲۰۰۵). ژن‌های  $Lsi1$ ،  $Lsi2$  و  $Lsi6$  در جذب و توزیع سیلیکون در برنج، جو، ذرت و خیار دخیل بودند (ما و یاماجی، ۲۰۱۵). توزیع سیلیکون در بافت‌های ریشه و ساقه به ناقلین ورودی سیلیکون (ژن‌های  $Lsi1$  و  $Lsi6$ ) وابسته است

(میتانی و همکاران، ۲۰۱۱). ناقل آنیونی (ژن Lsi2) در داخلی‌ترین بافت ریشه بیان می‌شود که

فعالیت آن پروتون محور بوده و به عنوان یک آنتی‌پورت Si/H عمل می‌کند (ما و همکاران، ۲۰۰۷).

## فصل دوم: بررسی منابع

## ۲-۱ خشکی و اثرات ناشی از آن در گیاهان زراعی

واکنش گیاهان به تنش، به ژنوتیپ، شدت و مدت اعمال تنش، مرحله رشدی، شرایط آب و هوایی (رابرتسون و هولاند، ۲۰۰۴)، اندام گیاهی و نوع سلول گیاهی بستگی دارد (تورچی و همکاران، ۲۰۰۲؛ داویسون و همکاران، ۲۰۰۴). خشکی دلیل اصلی کاهش رشد و عملکرد گیاهان بوده و منجر به تحریک پاسخ‌های دفاعی در سطح سلولی، ملکولی و فیزیولوژی می‌شود (دوآن و همکاران، ۲۰۰۷؛ شارما و دوبی، ۲۰۰۵) و تأثیرات وسیعی روی شرایط رشد، ساختار مورفولوژیکی و فیزیولوژی و بیوشیمی گیاهان دارد (جیل و همکاران، ۲۰۱۲؛ وو و همکاران، ۲۰۰۸) زمان وقوع تنش مهمتر از شدت آن می‌باشد (کورت و همکاران، ۱۹۸۳). حساس‌ترین مرحله رشدی در گیاهان مختلف، متفاوت می‌باشد به عنوان مثال؛ در سویا (برودن و اگلی، ۲۰۰۳) و لوبیا (نیلسن و نلسن، ۱۹۹۸) مرحله پرشدن دانه، در ذرت دو الی سه هفته بعد از ظاهر شدن کاکل (گرانث و همکاران، ۱۹۸۹)، در کلزا مراحل گل‌دهی و نمو خورجین‌ها (سیناکی و همکاران، ۲۰۰۷) و در برنج مرحله گل‌دهی و گرده‌افشانی (لی لی و فوکای، ۱۹۹۴) می‌باشد. فهم واکنش‌های بیوشیمیایی و مولکولی خشکی برای پی بردن به مکانیسم‌های مقاومت گیاه به شرایط کمبود آب ضروری است (آهوجا و همکاران، ۲۰۱۰). تنش خشکی به دلیل کاهش محتوای نسبی آب برگ، کاهش پتانسیل آب برگ، کاهش حالت تورژسانس سلول‌های نگهبان روزنه، بستن روزنه‌ها و کاهش در رشد سلول دیده می‌شود (اشرف، ۲۰۱۰؛ انجم و همکاران، ۲۰۱۱؛ جلیل و همکاران، ۲۰۰۹؛ رازاک و همکاران، ۲۰۱۳). اثرات منفی کمبود آب بر مواد معدنی و متابولیسم آنها باعث کاهش سطح برگ و تغییر در تقسیم مواد پرورده در جذب می‌شود (زین و همکاران، ۲۰۱۴).

## ۲-۱-۱ تأثیر تنش خشکی بر برخی صفات مورفولوژیکی

### ۲-۱-۱-۱ ارتفاع بوته

ارتفاع بوته تأثیر ویژه‌ای بر روابط آبی در گیاه ندارد اما صفت در شرایط خشکی با لحاظ نمودن سایر نکات زراعی مورد توجه است (بلوم و جردن، ۱۹۸۵). این صفت به محیط رشد وابسته است. ارتفاع بوته در صورت عدم تأمین آب مورد نیاز گیاه به علت کاهش تورژسانس سلول و تأثیر پذیری آن بر طول سلول های درحال رشد، کاهش می یابد. ارتفاع بوته تحت تأثیر شرایط تنش خشکی قرار می‌گیرد و ارتفاع بوته کاهش می یابد (شیرانی راد و همکاران، ۱۳۸۹). ژنوتیپ های پابلند به طور معنی‌داری عملکرد دانه بیشتری را نسبت به ژنوتیپ‌های پاکوتاه در شرایط خشکی پایان فصل داشتند که می‌توان این رخداد را به قابلیت بیشتر ژنوتیپ‌های پابلند برای دستیابی و استخراج آب از عمق خاک نسبت داد. طول دوره پر شدن دانه‌ها در ژنوتیپ‌های پابلند کمتر تحت تأثیر خشکی قرار می‌گیرد که ممکن است وجود ذخایر بیشتر آسیمیلات ها در ساقه و مصرف آن‌ها در دوره پر شدن دانه ها در این امر موثر باشد (ویسی مال امیری، ۱۳۸۵). محققان برای صفت ارتفاع بوته تفاوت بین ارقام و گونه‌های کلزا را گزارش داده‌اند (اقبال و همکاران، ۲۰۰۸). مطالعات صورت گرفته بر روی گیاه عدس نیز نشان داد که تنش خشکی در مراحل گل‌دهی و خورجین دهی موجب کاهش سطح برگ، ارتفاع بوته و عملکرد دانه گردید (شرستا و همکاران، ۲۰۰۶). 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 صورت می‌گیرد و هرچه ارتفاع بوته بلندتر باشد سطح فتوسنتزی و تولید مواد متابولیکی بیشتر خواهد بود (نورتون و همکاران، ۱۹۹۱). محققان دیگر نیز کاهش معنی‌دار صفات مورفولوژیک گیاه کلزا را در شرایط قطع آبیاری بعد از مراحل گل‌دهی و خورجین‌دهی را گزارش کردند (حسن‌زاده و همکاران، ۲۰۰۵). محققین گزارش نمودند بین تعداد شاخه های جانبی و عملکرد دانه کلزا همبستگی مثبت و معنی داری وجود دارد. نتایج این تحقیق

نشان داد در تمام ژنوتیپ ها بارتفاع بوته با افزایش تنش خشکی کاهش یافت و مهمترین اثر تنش خشکی کاهش رشد ساقه است. بررسی اثر تنش خشکی روی مولفه های رشد ساقه نشان داد که بیشترین کاهش مربوط به قطر ساقه و تعداد ساقه در بوته بود که مشخص کننده کاهش منابع ذخایر و تولید مواد فتوسنتزی در اثر تنش خشکی است. کاهش روند رشد در گره ها، دوام برگ و توسعه سطح برگ طی تنش خشک، باعث کاهش ارتفاع بوته می شود. رشد طولی ساقه با رشد شاخه های جانبی و توسعه خورجین ها در یک زمان رخ می دهد، که بروز تنش خشکی در این زمان باعث کاهش مواد ذخیره ای ساقه می شود و همچنین از توسعه شاخه های فرعی و اندام های ذخیره ای که تولید کننده خورجین ها هستند، جلوگیری کرده و با کم شدن مواد فتوسنتزی و کاهش جایگاه توسعه خورجین ها، به طور مستقیم، باعث کاهش عملکرد گیاه می شود (شریف و کشتا، ۲۰۰۶).

## ۲-۱-۱-۲ قطر ساقه

از صفات ارزیابی شدت تنش خشکی در گیاهان صفت قطر ساقه است (سدراس و همکاران، ۱۹۹۳). همانند ارتفاع بوته تحت تأثیر تقسیم شدن و بزرگ شدن سلول ها در شرایط تنش می باشد که شاید نتیجه اختلال در فتوسنتز، تعرق، فرایندهای متابولیکی در گیاه است (جونز و تاردینو، ۱۹۹۸؛ ساکر و همکاران، ۲۰۰۵). بررسی اثر تنش خشکی روی مولفه قطر ساقه نشان می دهد که تنش باعث کاهش منابع ذخیره و تولید مواد فتوسنتزی می گردد. تنش خشکی از طریق کاهش سرعت رشد در گره ها، کاهش گسترش سطح برگ و ماندگاری آن باعث کاهش ارتفاع بوته می گردد. بروز تنش خشکی در مرحله رشد طولی ساقه به همراه رشد شاخه های جانبی و توسعه خورجین ها، مواد ذخیره ساقه را کاهش داده و از توسعه اندام های ذخیره ای و شاخه های فرعی جلوگیری کرده و منجر به کاهش عملکرد گیاه می شود (سنگ تراش و همکاران، ۲۰۰۹). محققین گزارش نمودند، تنش خشکی در کلزا منجر به کاهش قطر ساقه شده است (سنگ تراش و همکاران، ۲۰۰۹؛ سیداحمدی و همکاران، ۱۳۹۴).

## ۲-۱-۱-۳ تعداد شاخه در بوته

وقتی گیاه کلزا فضای کافی برای رشد داشته باشد ظرفیت شاخه‌دهی آن چشمگیر است. تعداد شاخه‌های فرعی بارور در واحد سطح، تابعی از تراکم بوته، قدرت تولید شاخه‌های بارور و بقای آن است. طی دوره رشد گیاه تعداد شاخه در واحد سطح با رطوبت خاک در ارتباط است. از عوامل مهم در ثبات محصول می‌توان به قدرت تولید شاخه‌های فرعی در تولید و ساخت دانه اشاره کرد. تنش خشکی در مراحل گلدهی و توسعه غلاف‌ها بر تخصیص مواد فتوسنتزی بین اندام‌های زایشی و رویشی در گیاهان رشد نامحدود مانند کلزا اثر می‌گذارد که دلیل آن می‌تواند رقابت بین اندام‌ها در جذب مواد فتوسنتزی باشد (سیناکی و همکاران، ۲۰۰۷). کاهش معنی‌دار تعداد ساقه جانبی در کلزا تحت تنش خشکی رخ داد (سید احمدی و همکاران، ۱۳۹۴). همچنین اختلاف معنی‌داری بین میانگین تعداد شاخه جانبی در بوته در تیمار دیم با سایر تیمارها وجود داشت (شعبانی و همکاران، ۱۳۸۹).

## ۲-۱-۱-۴ طول خورجین

خورجین حاوی دانه می‌باشد و در مراحل ابتدایی پر شدن دانه با انجام فتوسنتز در رشد و نمو دانه موثر است. طول خورجین یک صفت ژنتیکی بوده و هنگامی که در مرحله رشد خورجین‌ها، به گیاه تنش اعمال شود انتقال مواد غذایی به دانه‌ها کاهش یافته و عملکرد کم می‌شود، که علت آن کاهش تعداد و اندازه خورجین‌ها است. شرایط مساعد کشت در این مرحله قادر است با افزایش جریان مواد غذایی، موجب افزایش تعداد گل‌ها و خورجین‌های حاوی دانه‌های بیشتر و درشت‌تر گردد. خورجین دارای سطح فعال فتوسنتزی بوده که قابل اهمیت است، که قادر است یک سوم وزن دانه را از طریق فتوسنتز آنها تامین نماید. تحقیقات بر روی کلزا نشان می‌دهد که بین سطوح دیواره‌های خورجین با تعداد دانه در آن همبستگی مثبت وجود دارد (سیرین واسا و مورگان، ۱۹۹۶). نتایج مطالعات نشان داده است که خورجین با تثبیت دوباره کربن حاصل از تنفس دیواره خود و انتقال آن به دانه در حال

رشد می تواند به عنوان یک اندام فتوسنتزی مطرح مورد توجه قرار گیرد (ما و همکاران، ۲۰۰۱ a). با اعمال تنش خشکی و کاهش مواد فتوسنتزی از میزان رشد و در نهایت سطح غلاف به ویژه هنگام پر شدن دانه کاسته شد که در نهایت باعث کاهش عملکرد دانه شد (رایت و همکاران، ۱۹۹۵). مهمترین عامل کاهش طول خورجین و در نتیجه آن کاهش عملکرد دانه، در واقع کاهش میزان فتوسنتز و انتقال فرآورده های فتوسنتزی به غلاف در اثر تنش خشکی است (سید احمدی و همکاران، ۱۳۹۴). هر چه طول خورجین بلندتر باشد عملکرد دانه نیز بیشتر خواهد بود و طول خورجین با تعداد دانه همبستگی مثبت دارد (دیینبروک، ۲۰۰۰).

## ۲-۱-۲ تأثیر تنش خشکی بر صفات عملکرد و اجزا عملکرد

عملکرد کلزا تابعی از تراکم، تعداد غلاف در بوته، تعداد دانه در غلاف و وزن هزار دانه می باشد (آنگدی، ۲۰۰۳). ارتفاع بوته، وزن خشک گیاه، تعداد و طول خورجین، تعداد دانه در خورجین و وزن هزار دانه صفاتی هستند که زمان بروز تنش خشکی و شدت آن بر آنها موثر است و موجب کاهش عملکرد دانه می گردد (شیخ و همکاران، ۱۳۸۴).

حساس ترین زمان برای آبیاری در کلزا مراحل گلدهی و اوایل خورجین دهی می باشد و کمبود آب در این مراحل موجب کاهش تعداد خورجین، دانه بندی و نیز کوچک ماندن دانه ها و در نهایت کاهش عملکرد دانه و روغن می گردد (سیناکی و همکاران، ۲۰۰۷). اگر مرحله ی رشد زایشی در گیاه با تنش خشکی همزمان رخ دهد، موجب کاهش صفات وابسته به عملکرد در کلزا مانند: تعداد خورجین در بوته، وزن هزار دانه و تعداد دانه در خورجین می شود که کاهش تعداد خورجین و تعداد دانه در خورجین باعث کاهش عملکرد دانه می شود (ما و همکاران، ۲۰۰۶). هنگامی که بوته های کلزا در مرحله ی رشد خورجین با تنش خشکی مواجه گردند، انتقال مواد فتوسنتزی به دانه ها تقلیل یافته و در نتیجه عملکرد کاهش می یابد (پاسبان اسلام، ۲۰۰۹). دیواره ی خورجین در حال رشد کلزا، برای جذب مواد فتوسنتزی با دانه های در حال توسعه به شدت رقابت می کند. به هنگام افزایش تنش های

محیطی این رقابت افزایش یافته و این امر باعث کاهش عملکرد دانه یا ریزش خورجین‌ها می‌گردد (رایت و همکاران، ۱۹۹۶). از سوی دیگر، تنش خشکی موجب می‌شود که طول دوره‌ی پرشدن دانه در کلزا به طور معنی‌داری کاهش یافته و عملکرد دانه به شدت تحت تأثیر قرار گیرد (فرجی و همکاران، ۲۰۰۹).

## ۲-۱-۲-۱ تعداد خورجین در بوته

صفت تعداد خورجین در بوته، که ظرفیت تشکیل دانه را فراهم می‌کند و به دلیل وجود پوسته سبز و انجام فتوسنتز قادر است درصدی از مواد غذایی برای پر شدن دانه را فراهم می‌کند، از اجزای مهم عملکرد دانه بشمار می‌آید (شیرانی‌راد و همکاران، ۲۰۱۳). عرضه کم مواد فتوسنتزی و ریزش گل و غلاف حین رشد دلیل کاهش این صفت ذکر شده است (رائو و مندهام، ۱۹۹۱؛ کومار و سینگ، ۱۹۹۸). مجموع خورجین‌های شاخه‌های فرعی و اصلی تعداد خورجین در بوته را تشکیل می‌دهد. عملکرد دانه در تک بوته‌ها شدیداً به تعداد خورجین در بوته وابسته است (هابیکت، ۱۹۹۳). تعداد خورجین که حاوی تعداد دانه می‌باشد و در واقع خورجین خود مواد فتوسنتزی مورد نیاز دانه را تأمین می‌کند که بر روی وزن دانه نیز موثر است. بنابراین واضح است که اعمال تنش آبی بقادر است باعث کاهش عملکرد دانه گردد زیرا باعث کاهش تعداد غلاف در بوته می‌شود (شیرانی‌راد و زندی، ۲۰۱۴؛ ما و یاماجی، ۲۰۰۶).

## ۲-۱-۲-۲ تعداد دانه در خورجین

به گزارش رائو و مندهام (۱۹۹۱) ژنوتیپ‌های مختلف کلزا برای تشکیل دانه در خورجین توانایی متفاوتی دارند. این صفت نیز از فاکتورهای مهم بر عملکرد نهایی دانه است. تعداد دانه سهم عمده‌ای در تعیین میزان مخزن گیاه دارد. هر عاملی که تعداد دانه را افزایش دهد، طبیعتاً سبب بالا رفتن عملکرد دانه نیز می‌شود. در بین اجزا عملکرد با کاهش یکی از اجزا، دیگر اجزا درصد جبران آن بر می‌آیند و از آن جایی که معمولاً وزن هزار دانه کمتر تغییر می‌کند، لذا بیشترین تغییرات در تعداد

دانه در بوته وجود دارد. انتخاب ارقامی که تعداد دانه در بوته آنها بهتر از اندازه دانه آنها است برای دستیابی به عملکرد بالا مفیدتر است، زیرا عملکرد با تعداد دانه در واحد سطح همبستگی زیادی دارد. غلاف‌های کلزا حاوی ۳۰ تا ۴۰ (راکو، ۱۹۷۸؛ مورگان، ۱۹۸۲) عدد دانه می‌باشند و پس از مرحله گرده افشانی، بسته به رقم میزان سقط و عوامل محیطی تنوع بالایی در توزیع و تعداد بذرها از دست رفته مشاهده می‌شود (بشورنر و اودنباچ، ۱۹۸۷). البته لازم به ذکر است که محدودیت‌هایی در تعداد دانه در خورجین وجود دارد و تأثیر عوامل محیطی کمتر از عوامل ژنتیکی می‌باشد (سید احمدی و همکاران، ۱۳۹۴). تنش خشکی موجب کاهش توان مخزن در جذب مواد فتوسنتزی و کاهش تعداد دانه در خورجین می‌شود (فیاض و همکاران، ۱۳۸۶).

## ۲-۱-۲-۳ وزن هزار دانه

یکی دیگر از اجزای عملکرد در ژنوتیپ‌های کلزا صفت وزن دانه است که اعمال تنش خشکی باعث کاهش مقدار آن در مقایسه با شاهد می‌شود. وزن هزار دانه تحت تأثیر عوامل ژنتیکی می‌باشد (رائو و همکاران، ۱۹۹۱؛ موریسن و همکاران، ۱۹۸۹). آخرین جزء عملکرد، که در طی مراحل نمو حاصل می‌گردد، وزن تک دانه است (دینبروک، ۲۰۰۰). سرعت و طول دوره پر شدن دانه در این صفت موثر است که توسط دو منبع فتوسنتز جاری و انتقال مجدد مواد ذخیره‌ای تامین می‌شود. تیمارهای قطع آبیاری باعث کاهش وزن دانه می‌شوند که می‌توان کاهش سرعت و دوره پر شدن دانه و از طرفی دیگر کاهش جذب آب و املاح و در نهایت کاهش ساخت و ساز فتوسنتزی و انتقال آن به دانه‌ها را دلیل کاهش این صفت دانست (سیناکی و همکاران، ۲۰۰۷؛ پازوکی، ۱۳۷۹).

## ۲-۱-۲-۴ عملکرد بیولوژیکی

ماده خشک بالا در واحد سطح عامل اصلی جهت رسیدن به عملکرد بالا است (سرمدنیا و کوچکی، ۱۳۷۶). عوامل محیطی قادرند میزان تجمع ماده خشک کل گیاه را که نتیجه تجمع مواد فتوسنتزی می‌باشد، تحت تأثیر قرار دهند (سبحانی، ۱۳۷۹). تنش خشکی، تجمع ماده خشک را به طور منفی

تحت تأثیر قرار می‌دهد. تنش خشکی منجر به کاهش سطح برگ و ظرفیت فتوسنتزی گیاه شده و سبب کاهش تولید و تجمع ماده خشک می‌گردد (قاسمی گلعدانی و همکاران، ۲۰۰۹). کوتاه شدن مراحل رویشی و زایشی منجر به کاهش رشد رویشی، درصد پوشش سبز و اجزای عملکرد می‌گردد که در نهایت باعث افت عملکرد بیولوژیکی تحت تنش خشکی می‌گردد (قاسمی گلعدانی و مردفر، ۲۰۰۸). یک شاخص برای سازگاری گیاهان به خشکی در پایان فصل، تجمع ماده خشک در اندام‌های هوایی است که با عملکرد مناسب در شرایط تنش خشکی مرتبط است (امام و ثقه الاسلامی، ۱۳۸۴). در یک آزمایش تجمع ماده خشک همراه با افزایش میزان آب خاک افزایش یافت. همچنین، ماده خشک کل گیاه و تجمع آن با میزان آب خاک همبستگی مثبت معنی‌داری داشت (ناچتیگال و همکاران، ۱۹۹۰).

## ۲-۱-۲-۵ عملکرد دانه

از اهداف کشت کلزا عملکرد بهینه می‌باشد (اوزر و اورال، ۱۹۹۹). شناخت بهتر روند تحمل به تنش خشکی برای بهبود بخشیدن به عملکرد گیاه از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد (جان گروننگلنگ و همکاران، ۲۰۱۳). عواملی مانند مرحله نمو در زمان وقوع تنش، مدت و شدت تنش قادرند میزان کاهش عملکرد را تعیین کنند (ریچاردز و تورلینگ، ۱۹۷۸). تنش خشکی در طول دوره زایشی، به عنوان مهم‌ترین عامل روی عملکرد دانه است (کوستا فرانکا و همکاران، ۲۰۰۰)، که باعث کاهش طول مدت گلدهی و پرشدن دانه شود و منجر به کاهش تعداد دانه و متوسط وزن دانه و نهایتاً عملکرد دانه گردد. این اثرات با افزایش شدت تنش خشکی افزایش می‌یابد (قاسمی گلعدانی و مردفر، ۲۰۰۸؛ قاسمی گلعدانی و همکاران، ۲۰۱۰). تحت تأثیر تنش خشکی کاهش معنی‌داری بر خصوصیات رشدی، عملکرد دانه کلزا گزارش شد و محققین نشان دادند که با افزایش دور آبیاری از هفت به ۱۴ و ۲۸ روز عملکرد دانه کاهش معنی‌داری داشت (آل‌بارک، ۲۰۰۶). محققان دیگر نیز کاهش عملکرد دانه بواسطه کمبود آب را گزارش کردند (محمد و نسیم، ۲۰۰۶؛ نصری و همکاران، ۲۰۰۸). محققان بیشترین کاهش عملکرد دانه را وقتی که تنش خشکی در مرحله گل‌دهی یا مرحله نمو غلاف اتفاق

افتاد، مشاهده کردند که کاهش عملکرد دانه تحت تأثیر تنش های خشکی کوتاه مدت در طی مراحل بلند شدن ساقه، گل دهی و نمو غلاف تا حد زیادی به کاهش تعداد خورجین در گیاه و در طی نمو دانه به کاهش وزن دانه مرتبط است و بیشترین حساسیت به تنش خشکی طولانی مدت را صفت تعداد خورجین در بوته در بین اجزاء عملکرد داشت (سیناکی و همکاران، ۲۰۰۷).

## ۲-۱-۲ شاخص برداشت

شاخص برداشت متأثر از دو عامل عملکرد اقتصادی به عملکرد بیولوژیکی می باشد و با توجه به این که عملکرد بیولوژیک کمتر از عملکرد اقتصادی تحت تأثیر تنش خشکی قرار می گیرد، با اعمال تنش خشکی شاخص برداشت کاهش می یابد (پازوکی، ۱۳۸۹). شاخص برداشت بالاتر در کلزاهای پر محصول دیده شده است (سنا و همکاران، ۲۰۰۳). تنش خشکی با تغییر شاخص برداشت بر عملکرد گیاهان زراعی اثر می گذارد. قبلاً محققین اذعان داشتند که زمان های مختلف وقوع تنش در گیاه دانه روغنی سویا تأثیری در شاخص برداشت ندارد. آنها بر این عقیده اند که فرایندهای رویشی و زایشی گیاه به یک میزان تحت تأثیر تنش رطوبتی قرار می گیرند و به همین دلیل، شاخص برداشت در وضعیت های مختلف رطوبتی از ثبات زیادی برخوردار است و تغییرات ماده خشک کل گیاه و عملکرد دانه در مقایسه با شاخص برداشت در پاسخ به تنش آب بیشتر است (اسپیت و همکاران، ۱۹۸۴). احتمالاً اختلاف بین ژنوتیپ ها در شاخص برداشت می تواند ناشی از اختلاف ژنتیکی بین آنها از نظر ظرفیت اختصاص تولیدات فتوسنتزی به بخش زایشی و دانه باشد. این در حالی است که در اغلب گیاهان زراعی امروز شاخص برداشت در اثر فعالیت های به نژادی به طرز محسوسی افزایش داشته است و حتی در گیاهانی نظیر غلات دانه ریز به مرز ۵۰ درصد رسیده است. محققان گزارش کردند که تنش با کاهش تعداد خورجین سبب کاهش ۲۵ تا ۳۵ درصد در شاخص برداشت کلزا می گردد (والتون و همکاران، ۱۹۹۹). کاهش شاخص برداشت در شرایط تنش خشکی، ناشی از عدم انتقال مواد فتوسنتزی به دانه در طول دوره پر شدن دانه می باشد. شاخص برداشت در شرایط خشکی کاهش

می‌یابد (درجانی و همکاران، ۲۰۱۳؛ سینگ و همکاران، ۲۰۰۹؛ میری، ۲۰۰۷). زیرا عملکرد بیولوژیکی و عملکرد دانه در سرعت‌های مختلف کاهش می‌یابند. کاهش شاخص برداشت احتمالاً به دلیل تأثیر بیشتری است که بر عملکرد دانه دارد و همچنین کاهش کمتر عملکرد بیولوژیک در مقایسه با عملکرد دانه است (انوار و همکاران، ۲۰۲۰). همچنین خاکوانی و همکاران (۲۰۱۲) گزارش دادند که در یک ارزیابی پاسخ شش ژنوتیپ گندم به سطوح مختلف تنش خشکی و شرایط عادی صفات شاخص برداشت و عملکرد بیولوژیکی به طور قابل توجهی کاهش یافت. کاهش شاخص برداشت در اکثر مطالعات گزارش شده است (دوگان و همکاران، ۲۰۱۱؛ سیناکی و همکاران، ۲۰۰۷؛ فرجی و همکاران، ۲۰۰۹).

## ۳-۱-۲ تأثیر تنش خشکی بر برخی صفات فیزیولوژیکی

### ۲-۱-۳-۱ محتوای نسبی آب برگ<sup>۱</sup>

شاخص‌هایی مانند محتوای نسبی آب برگ، پتانسیل آب برگ،<sup>۲</sup> فشار تورژسانس<sup>۳</sup> و پتانسیل اسمزی<sup>۴</sup> جهت ارزیابی وضعیت آبی گیاهان مورد بررسی قرار می‌گیرد (پورمحمد کیانی و همکاران، ۲۰۰۷). محتوای نسبی آب برگ تعادل بین تأمین آب به بافت برگ و میزان تعرق را نشان می‌دهد (لوگوچان و سیولکا، ۲۰۱۱). امروزه ارزیابی کلاسیک میزان آب براساس تغییر وزن بین برگ‌های تازه و خشک صورت می‌گیرد که زمان بر می‌باشد. با توجه به اینکه شناسایی تنش آبی گیاهان ناشی از خشکسالی یک هدف اصلی برای سنجش از دور در مزارع می‌باشد، با استفاده از شاخص‌های مادون قرمز، تعیین تنش آب گیاهان با سنجش از دور انجام می‌گردد. امروزه تجزیه و تحلیل طیف سنجی مادون قرمز نزدیک برای اندازه‌گیری محتوای نسبی آب به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است (پریولنیک و همکاران، ۲۰۱۱؛ وحید و همکاران، ۲۰۱۵).

<sup>1</sup> Relative Water Content

<sup>2</sup> Leaf Water Potential

<sup>3</sup> Turgor potential

<sup>4</sup> Osmotic potential

برخی از مطالعات حاکی از قابل اطمینان بودن پارامتر محتوی نسبی آب برگ به عنوان شاخص تحمل به خشکی می باشد (سینکلایر و لودلو، ۱۹۸۵؛ جلیلیان و همکاران، ۱۳۹۴). سیدکو و همکاران (۲۰۱۳) اذعان داشتند که با افزایش تنش آبی، این صفت در گندم کاهش یافته و علت آن را کاهش پتانسیل آب برگ و کاهش جذب آب توسط ریشه در شرایط خشک ذکر کردند. تنش خشکی می تواند محتوای نسبی آب برگ ارقام کلزا را به طور معنی داری کاهش دهد، هرچند این کاهش میان ارقام متفاوت می باشد (قدرتی، ۱۳۹۲؛ مرادی اقدم و همکاران، ۱۳۹۷). بسته شدن روزنه نوعی پاسخ اولیه به تنش خشکی در خاک بوده که با تنظیم روزنه از اتلاف زیاد آب از طریق تعرق جلوگیری می گردد. افزایش تنش خشکی با کاهش مقدار آب قابل دسترس و جذب شده، موجب کاهش محتوای نسبی آب برگ می شود (حیدری و همکاران، ۱۳۹۲). در زمان تنش خشکی دیواره سلولی آسیب دیده و مایع سلولی به داخل فضای بین سلولی تراوش می شود و باعث افزایش غلظت و هدایت الکتریکی محلول می گردد. هر چه غلظت بیشتر گردد در واقع سلول های بیشتری تخریب می گردند (درویش بلوچی و همکاران، ۱۳۸۹؛ صدیق و همکاران، ۲۰۰۰). پژوهش ها بر روی کلزا نشان داد که محتوی نسبی آب برگ در تیمارهای تنش نسبت به تیمارهای آبیاری کمتر بود اما در شرایط تنش خشکی میزان آن کاهش یافت (غفاری و همکاران، ۲۰۱۱).

## ۲-۳-۱-۲ مقاومت روزنه ای

ظهور روزنه حدوداً ۴۰۰ میلیون سال قبل (ادوارد و همکاران، ۱۹۹۸) همزمان با ارزیابی سیستم تکامل آب داخلی گیاهان در فسیل ها گزارش شد. اعتقاد بر این است که تکامل روزنه ای پاسخی به فشار انتخابی برای بهینه سازی نسبت جذب  $CO_2$  به آب از دست رفته در هنگام فتوسنتز است (راون، ۲۰۰۲). در شرایط محدودیت آب خاک و یا تقاضای بالای تبخیر جوی، بسته شدن جزئی یا کامل روزنه باعث می شود که گیاهان ضمن حفظ محدودیت افزایش کربن، تعادل آب مطلوب را حفظ کنند (فرانک، ۲۰۱۳؛ وینیا و همکاران، ۲۰۱۳). باز شدن روزنه به چندین عامل محیطی و فیزیولوژیکی

مانند نور، غلظت دی اکسید کربن، کسری فشار بخار برگ به هوا، وضعیت آب برگ/گیاه و اسید آبسازیک بستگی دارد (فرکوهر و شارکی، ۱۹۸۲). هنگامی که در دسترس بودن آب برای فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه محدود می‌شود، بستن روزنه به عنوان یک واکنش زودهنگام باعث افت فشار پتانسیل آب آوند چوبی می‌گردد (جونز، ۱۹۹۱). با توجه به اینکه هدایت روزنه به‌طور کلی با هدایت هیدرولیکی فاز مایع از خاک به برگ هماهنگ می‌شود (ماینزر، ۲۰۰۲)، این یافته‌ها نشان می‌دهد که دهانه روزنه در درجه اول توسط سیگنال‌های هیدرولیکی تنظیم می‌شود (فرانکز، ۲۰۰۴). از طرف دیگر، مطالعات متعددی بر نقش برجسته‌ای که توسط تولید/تجمع ABA در تعدیل بسته شدن روزنه ایفا شده است، تأکید کرده‌اند (دیویس و همکاران، ۲۰۰۵؛ لوآن، ۲۰۰۲). تصور می‌شود که ABA تحت شرایط تنش آبی، در سطح ریشه یا برگ سنتز می‌شود و منجر به غیرقطبی شدن غشاهای سلول نگهبان می‌شود که باعث ایجاد جریان یون اسمزی و از بین رفتن تورژسانس سلول نگهبان می‌شوند (بایور و همکاران، ۲۰۱۳؛ گیگر و همکاران، ۲۰۱۱). محققان نشان دادند که تنش خشکی بر ارقام کلزا منجر به افزایش مقاومت روزنه‌ای آن‌ها می‌شود (مرادی‌ا قدم و همکاران، ۱۳۹۷) و با بسته شدن روزنه‌ها و در نتیجه کاهش دسترسی به CO<sub>2</sub> در مزوفیل منجر به کاهش فتوسنتز گیاه می‌گردد (حیدری و همکاران، ۱۳۹۲). نتایج آزمایش در کلزا نشان داد که کمبود آب در سلول‌های برگ با کاهش در میزان هدایت روزنه‌ای (انتشار دی اکسیدکربن به فضای بین سلولی) و کلروفیل میزان فتوسنتز را کاهش می‌دهد (جنسن و همکاران، ۱۹۹۶). در آزمایش دیگری مشخص شد که هدایت روزنه‌ای در ژنوتیپ‌های حساس به خشکی تحت شرایط تنش، از ارقام متحمل کمتر بود (کوزوران، ۲۰۱۱). در آزمایشی مشخص شد که تحت تنش خشکی هدایت روزنه‌ای به طور معنی‌داری کاهش یافت که ژنوتیپ‌های با بالاترین توانایی تنظیم اسمزی تحت تنش، کمترین کاهش را در هدایت روزنه‌ای داشتند (پاسبان‌اسلام و همکاران، ۲۰۰۰). با افزایش تنش آبی هدایت روزنه‌ای کم شده و مقاومت روزنه‌ای افزایش می‌یابد. محققان بسیاری معتقدند که تنش خشکی تأثیرات منفی بر مقاومت

روزنه‌ای دارد (پاسبان اسلام و همکاران، ۲۰۰۰؛ شهسواری و دادرسیا، ۲۰۱۶؛ شهسواری و همکاران، ۲۰۱۴؛ فنایی و همکاران، ۲۰۱۲؛ کوثری و همکاران، ۲۰۰۶؛ نادری خرجی و همکاران، ۲۰۰۸).

## ۲-۱-۳-۳ دمای کانوپی

دمای کانوپی یا دمای تاج پوشش گیاه طی روزهای اولیه تنش خشکی می‌تواند به عنوان شاخص گزینش برای تحمل به تنش خشکی در ژنوتیپ‌های کلزا باشد (پاسبان اسلام، ۲۰۰۹؛ کومار و سینگ، ۱۹۹۸). دمای کانوپی با تنش کم آبی تطابق دارد به‌طوری‌که به دنبال کم شدن آب قابل دسترس در خاک، تعرق در گیاه کاهش یافته و بر مبنای بیلان انرژی در سطح برگ، کاهش تعرق باعث افزایش دمای کانوپی می‌گردد (کارکوا و همکاران، ۱۹۹۸). گیاهان تحت تنش با تنظیم روزنه‌ای مانع از اتلاف شدید آب شده که منجر به افزایش دمای کانوپی می‌گردد (کورنیک، ۲۰۰۰). با توجه به همبستگی مثبت و معنی‌دار خنک شدن تعرقی با تنظیم اسمزی و هدایت روزنه‌ای، سادگی و سرعت اندازه‌گیری دمای برگ نسبت به شاخص‌های مزبور می‌توان با اندازه‌گیری دمای تاج پوشش گیاهی در مراحل حساس رشدی در کلزای تحت تنش کم آبی نسبت به شناسایی و گزینش ژنوتیپ‌های مقاوم به خشکی در کلزا برای مناطقی که با محدودیت آبی مواجه‌اند، اقدام نمود (کومار و سینگ، ۱۹۹۸). تحت تنش خشکی کاهش معنی‌داری در پتانسیل آب برگ و سرعت تنفس مشاهده شد که در نهایت منجر به افزایش دمای برگ و کانوپی گردید (تورنر و همکاران، ۲۰۰۱).

## ۲-۱-۴ تأثیر تنش خشکی بر برخی صفات بیوشیمیایی

### ۲-۱-۴-۱ پرولین

از پاسخ‌های بیوشیمیایی به تنش می‌توان به تجمع متابولیت‌ها که قابلیت انحلال داشته ولی متابولیسم طبیعی گیاه را مختل نمی‌کنند، اشاره کرد. این مواد که به اسمولیت‌ها معروفند شامل قندها و متابولیت‌های دارای بار الکتریکی مثل گلیسین بتائین و اسیدهای آمینه‌ای چون پرولین است

(هسو و همکاران، ۲۰۰۳؛ رینز، ۱۹۸۹؛ یامچی و همکاران، ۱۳۸۳). پرولین یکی از مهم‌ترین مواد محلول سازگار شناخته شده می‌باشد که سبب استواری ساختار سه بعدی پروتئین‌ها و محافظت از سیستم فتوسنتزی و غشای سلولی (فربقوگن و هرمنس، ۲۰۰۸)، تنظیم اسمزی (آذرپناه و همکاران، ۲۰۱۳؛ باردواج و یاداو، ۲۰۱۲) و مهار گونه‌های فعال اکسیژن (اشرف و فولاد، ۲۰۰۷) در واکنش به تنش‌های غیرزیستی می‌گردد. تجمع پرولین در شرایط تنش صورت می‌گیرد، به‌طوری‌که پرولین در بسیاری از گیاهان به عنوان نشانگر بیوشیمیایی برای تشخیص تحمل به تنش مورد استفاده قرار می‌گیرد (اسرینیواس و بالاسوبرامانیان، ۱۹۹۵). پرولین یک تنظیم کننده اسمزی بوده که موجب سازش سلول گیاهی برای زنده ماندن در شرایط تنش‌زا و حفاظت آنزیم‌ها و پروتئین‌های غشایی در برابر تغییرات ساختاری می‌شود. جهت حفظ لیپیدهای غشا از خسارت القاشده توسط رادیکال‌های آزاد اکسیژن، افزایش پرولین مشاهده می‌شود و با افزایش مقدار و فعالیت آنزیم‌ها و پروتئین‌های دفاعی، در حفظ ساختمان کلروپلاست دستگاه فتوسنتز و کاهش تنش اکسیداتیو حاصل از تنش نقش دارد (اشرف و فولاد، ۲۰۰۷؛ کاوی و همکاران، ۲۰۰۵؛ یانسی، ۱۹۹۴). تجمع پرولین در سلول از طریق دو کاتالیز متوالی به وسیله پرولین-۵-کربوکسیلات سنتتاز (P5CS) و پرولین-۵-کربکسیلات ردوکتاز (P5CR) انجام می‌شود. در واقع در شرایط تنش خشکی فعالیت آنزیم P5CS افزایش یافته و مقدار پرولین را در داخل سلول به حدی بالا می‌برد که از خسارت زیاد کم آبی به گیاه جلوگیری می‌کند (دلانونی و ورما، ۱۹۹۳). پرولین همچنین قادر است با سایر اجزای سیتوپلاسمی تطابق یافته و به سهولت به گلوتامات تغییر یابد که در ساخت سایر اسیدهای آمینه مشارکت دارد. در زمان تنش پرولین در گیاه تجمع می‌یابد، در واقع ساخت آن به علت واکنش غیراختصاصی به پتانسیل آب پایین است. تجمع پرولین ممکن است به دلیل کاهش اکسیداسیون پرولین یا تحریک سنتز آن از گلوتامات یا افزایش فعالیت آنزیم پروتئاز باشد (شارما و کوهده، ۲۰۰۶). پرولین نقش محافظت کنندگی آنزیم‌های سیتوزولی (حفاظت از آنزیم کربوکسیلاز) و ساختار سلولی را بر عهده دارد لذا پرولین در شرایط تنش، در سلول انباشت می‌شود (اکبری مقدم، ۱۳۹۱). افزایش میزان پرولین در مطالعات

بسیاری تحت تنش خشکی گزارش شده است (قربانلی و همکاران، ۲۰۱۳؛ شارما و کوهده، ۲۰۰۶). میزان پرولین برگ در شرایط قطع آبیاری به دلیل نقش خود در تنظیم اسمزی افزایش می‌یابد، این امر موجب حفظ تورژسانس سلول‌ها می‌شود که نقش حفظ کننده گیاه در شرایط تنش خشکی را بر عهده دارد که میزان آن در ژنوتیپ‌های متحمل به تنش خشکی بیشتر می‌باشد (آرانجولو و همکاران، ۲۰۱۱؛ میرزایی و همکاران، ۱۳۹۲). بین پرولین و مقاومت اسمزی در گلرنگ ( *Carthamus tinctorius* L.) ارتباط مستقیمی وجود دارد (مهدوی و همکاران، ۲۰۱۱). مقادیر زیاد و یا کم پرولین نمی‌تواند یک معیار مقاومت و برتری در ژنوتیپ‌های مقاوم به خشکی باشد (ابراهیمیان و همکاران، ۲۰۱۲).

## ۲-۴-۱-۲ کلروفیل

فتوسنتز یک فرایند اساسی برای حفظ رشد و نمو گیاه بوده و به روشنی مشخص است که سیستم‌های فتوسنتزی در گیاهان نسبت به تنش خشکی حساس هستند (فالک و همکاران، ۱۹۹۶). کلروفیل یکی از اجزای اصلی کلروپلاست برای فتوسنتز است و محتوای نسبی کلروفیل با میزان فتوسنتزی رابطه مثبت دارد (گو و لی، ۲۰۰۰). محققین نشان دادند که میزان کلروفیل تحت تنش خشکی ناشی از PEG در برنج کاهش یافته است (دلال و تریپاتی، ۲۰۱۲). گنجی ارجناکی و همکاران (۲۰۱۲) در آزمایش خود، کاهش میزان کلروفیل را به دلیل تنش در گندم گزارش کردند. قرار گرفتن در معرض تنش خشکی منجر به اثرات معنی‌داری در محتوای کلروفیل a و b می‌گردد (رنجبرفوردی و همکاران، ۲۰۰۰). در مطالعه‌ای محتوای کلروفیل نیز نسبت به کمبود آب حساسیت قابل توجهی نشان داد به‌طوری‌که با تنش خفیف آبیاری، کل محتوای کلروفیل در مقایسه با شرایط آبیاری معمولی کاهش یافت و در تنش شدید آبیاری، کاهش بیشتری مشاهده گردید (احمدی‌خواه و معروفی نیا، ۲۰۱۶). دلیل کاهش میزان کلروفیل در اثر تنش خشکی این است که خشکی با تولید گونه‌های فعال اکسیژن مانند  $O_2$  و  $H_2O_2$  می‌تواند منجر به پراکسیداسیون لیپیدها و در نتیجه از بین رفتن کلروفیل

شود (فویر و همکاران، ۱۹۹۴؛ اسمیرنف، ۱۹۹۳؛ هیرت و شینوزاکی، ۲۰۰۴). وضعیت انرژی کلروپلاست ناشی از تنش خشکی افزایش می‌یابد که رابطه مستقیمی با افزایش کلروفیل کل و کلروفیل a و b در بین واقعیت‌های ناشی از استرس دارد (رنجرفوردی و همکاران، ۲۰۰۰).

چگنی و همکاران (۱۳۹۵) در بررسی خود نشان دادند تنش خشکی آخر فصل باعث کاهش کلروفیل کل از ۱/۵۰۶ به ۱/۲۳۹ میلی گرم در گرم وزن تر ارقام کلزا گردید. بررسی‌ها نشان می‌دهد تنش خشکی با تولید اکسیژن‌های فعال موجب تجزیه کلروفیل برگ می‌شود (کامروا و همکاران، ۱۳۹۶). کاهش مقادیر کلروفیل تحت تنش خشکی، توسط دیگر محققین گزارش شده است (کوثری و همکاران، ۲۰۰۶). آنها اعلام کردند که میزان کلروفیل a و b، متأثر از خشکی بوده و می‌تواند به عنوان یکی از شاخص‌های تحمل به خشکی مورد توجه قرار گیرد. این تغییرات احتمالاً می‌تواند به این دلیل باشد که در شرایط تنش خشکی تولید رادیکال‌های آزاد در سیستم فتوسنتزی افزایش یافته و گیاه با فعال کردن آنزیم کلروپلاز اقدام به تخریب محتوای کلروفیل خود می‌کند تا به این طریق از افزایش تخریب سایر سلول‌های گیاهی توسط رادیکال‌های آزاد جلوگیری کند. تنش خشکی میزان کلروفیل a را در ارقام کلزا کاهش داد. کاهش رنگدانه‌های فتوسنتزی ممکن است به دلیل کاهش سنتز کمپلکس‌های رنگدانه‌ای کد شده بوسیله خانواده ژنی *cab* و یا تخریب نوری کمپلکس‌های پروتئین رنگدانه کلروفیل a و b که کار آنها محافظت از وضعیت فتوسنتزی است و یا ممکن است به دلیل تخریب اکسیداتیو لیپیدهای کلروپلاست، پروتئین‌ها و یا رنگدانه‌ها باشد. ضریب ثبات کلروفیل نسبت میزان کلروفیل کل در شرایط تنش به میزان کلروفیل کل در شرایط بدون تنش، به عنوان یک معیار مناسب جهت تعیین میزان مقاومت ژنوتیپ‌ها به تنش خشکی مطرح است (ترزی و کدی‌آق‌لو، ۲۰۰۶). تاثیر تنش خشکی بر میزان کلروفیل‌ها وابسته به شدت و مدت تنش خشکی و نوع گونه گیاهی می‌باشد (گورفل و همکاران، ۲۰۰۹).

## ۲-۱-۴-۳ کربوهیدرات برگ

کربوهیدرات‌ها به عنوان تنظیم کننده های اسمزی، ثبات دهنده غشاهای سلولی و حفظ کننده تورژسانس سلول‌ها، عمل می کنند. در حقیقت، در گیاهانی که قندهای محلول در پاسخ به تنش خشکی تجمع می‌یابند، تنظیم اسمزی بهتر صورت می‌گیرد (اسلاما و همکاران، ۲۰۰۷). اثر تنش خشکی روی کربوهیدرات‌ها به گونه و بافت گیاهی بستگی دارد. کربوهیدرات‌ها، به طور عمده ساکارز، در برگ‌های منبع بالغ سنتز می‌شود و برای حفظ سوخت و ساز هتروتروفیک و رشد یا برای ذخیره‌سازی به عنوان ساکارز یا نشاسته در گیاهان عالی تبدیل می‌شوند (یو و همکاران، ۲۰۱۵). تنش‌های محیطی بر متابولیسم قندها و پخش مواد فتوسنتزی در گیاهان در حال رشد اثر می‌گذارند. در تنش خشکی، تنظیم کننده های اسمزی می‌توانند قدرت جذب آب را از خاک توسط ریشه افزایش دهند (هونگبو و همکاران، ۲۰۰۶). در مطالعه ای که روی دو رقم ذرت انجام شد، غلظت قندهای محلول با اعمال تنش خشکی افزایش یافت (محمدخانی و حیدری، ۲۰۰۸). محققین در بررسی‌های خود نشان دادند که میزان قندهای محلول گلوکز، مانوز و رامنوز در بافت‌ها در رقم‌های مختلف میزان متفاوتی را نشان دادند (میرزایی و همکاران، ۱۳۹۲). افزایش غلظت کربوهیدرات محلول بر اثر تنش خشکی در کلزا (کرکگارد و همکاران، ۲۰۰۸؛ مرادشاهی و همکاران، ۲۰۰۴)، کنجد (آئین، ۱۳۹۱)، کتان روغنی (پاریدا و همکاران، ۲۰۰۸)، گندم (بلوچی و همکاران، ۲۰۰۹؛ جوهری پیروی‌تلو، ۲۰۱۰)، سویا (لیو و همکاران، ۲۰۰۴)، لوبیا (کلودیا و همکاران، ۲۰۱۲) و برنج (پیردشتی و همکاران، ۲۰۰۹؛ مستاجران و رحیمی‌ایچی، ۲۰۰۹) نیز گزارش شده است. به عقیده برخی محققین در طول دوره تنش، قندها به عنوان یکی از مکانیسم‌های مقاومت عمل می‌کنند (اسلاما و همکاران، ۲۰۰۷؛ بای و همکاران، ۲۰۱۳).

## ۲-۴-۱-۴ گلوکوزینولات

گلوکوزینولات‌ها متابولیت‌های ثانویه هستند که حاوی نیتروژن و گوگرد بوده، که در خانواده چلیپانیان (شعبه) فراوان هستند و سطح آنها تحت تأثیر تنش خشکی قرار می‌گیرد (ردوونیکویک و

همکاران، ۲۰۰۸؛ مارتینز بالستا و همکاران، ۲۰۱۳) و با استفاده از مسیرهای بیوسنتز اصلی سنتز می‌شوند (هالکیر و گرشنزون، ۲۰۰۶). کلزا حاوی بالاترین غلظت گلوکوزینولات‌های آلکن شامل: پروگویتترین<sup>۱</sup>، گلوکوناپین<sup>۲</sup>، گلوکوبراسیکاناپین<sup>۳</sup>، ناپولیفرین<sup>۴</sup> و گلوکوزینولات‌های ایندول: ۴-هیدروکسی گلوکوبراسایسین<sup>۵</sup> و گلوکوبراسایسین<sup>۶</sup> می‌باشد. زوکالوا و واساک (۲۰۰۲) گزارش دادند که گلوکوزینولات از اسیدهای آمینه متیونین، آلانین، والین، لوسین، ایزولوسین (آلیفاتیک گلوکوزینولات)، تیروزین، فنیل آلانین (آلکنیل گلوکوزینولات) و تریپتوفان (ایندول گلوکوزینولات) سنتز می‌شوند. مقدار گلوکوزینولات دانه یک عامل استاندارد در ارزیابی کیفیت کنجاله کلزا به حساب می‌آید، به طوری که سودمندی کنجاله باقی‌مانده از روغن‌کشی دانه‌های کلزا در تغذیه دام به علت حضور گلوکوزینولات‌ها کاهش می‌یابد، زیرا این مواد، ترکیبات سمی مضر برای دام ایجاد می‌کنند. محتوای گلوکوزینولات‌ها در دانه‌های روغنی به طور مضاعف در ارقام زمستانه و بهاره نباید بیش از ۱۵ میکرومول در هر گرم ماده خشک بدون روغن دانه باشد (گوگالا و همکاران، ۲۰۲۰). میزان گلوکوزینولات به عوامل ژنتیکی (پرزبیلیسکی، ۲۰۱۱؛ راج‌چک و همکاران، ۲۰۱۷؛ سیکورسکا و همکاران، ۲۰۱۸؛ وندا پیسیک و هوپی، ۲۰۱۸)، روش‌های زراعی (جانکوسکی و همکاران، ۲۰۱۹؛ فیلیپک مازور و همکاران، ۲۰۱۹) و شرایط محیطی (سیکورسکا و همکاران، ۲۰۱۸؛ وارگا و همکاران، ۲۰۱۴) بستگی دارد. در کلزا، میزان پروتئین و روغن تحت تأثیر سطح اروسیک اسید و گلوکوزینولات قرار دارد (شی و همکاران، ۲۰۱۱). محققان بسیاری در مطالعات زیادی افزایش گلوکوزینولات در کلزا را تحت تنش خشکی گزارش دادند (اولا و همکاران، ۲۰۱۲؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۰۸؛ شراینر و همکاران، ۲۰۰۹؛ کوزنیرویچ و همکاران، ۲۰۰۸). مارتینز بالستا و همکاران (۲۰۱۳) گزارش کردند که مدت و شدت تنش خشکی از عوامل مهم در تجمع گلوکوزینولات است. گلوکوزینولات یک ترکیب

<sup>1</sup> Progoittrin

<sup>2</sup> Gluconapin

<sup>3</sup> Glucobrassicinapine

<sup>4</sup> Napoleiferin

<sup>5</sup> 4-hydroxy glucobrassicin

<sup>6</sup> Glucobrassicin

سیگنالینگ در شرایط تنش است. اعمال تنش قادر است میزان روغن و لینولئیک اسید را کاهش و محتوای گلوکوزینولات و استئاریک اسید را افزایش دهد (مقدم و همکاران، ۲۰۱۱). با این حال، در طول تنش، گیاه کلزا با تولید املاح مختلف و بهبود فیزیولوژی می‌تواند در شرایط نامطلوب زنده بماند (زاهدی و مقدم، ۲۰۱۱). تنش خشکی در مرحله گلدهی کلزا باعث انباشتگی گلوکوزینولات و در نهایت کاهش عملکرد می‌گردد (بوشرائو و همکاران، ۱۹۹۶).

## ۲-۱-۴-۵ درصد و عملکرد روغن

کیفیت روغن کلزا توجه جهانی را به خود جلب کرده است. میزان سودآوری کلزا بستگی به میزان روغن تولیدشده در واحد سطح دارد (رابرتسون و هولاند، ۲۰۰۴). میزان روغن دانه صفتی با وراثت‌پذیری بالا می‌باشد که البته تا حدودی هم تحت تأثیر عوامل محیطی قرار می‌گیرد. عملکرد روغن در مقایسه با درصد روغن دانه، بیشتر تحت تأثیر کمبود رطوبت خاک قرار می‌گیرد. به نظر می‌رسد که درصد روغن دانه بیشتر توسط عوامل ژنتیکی کنترل می‌شود ولی عملکرد روغن تحت تأثیر تغییرات عملکرد دانه می‌باشد (زارعی و همکاران، ۲۰۱۰). تنش خشکی که در دوره‌های حساس تشکیل و پر شدن دانه رخ می‌دهد، باعث کاهش کمیت و کیفیت روغن دانه می‌گردد (مالکی و همکاران، ۲۰۱۳). همچنین محققین دریافته‌اند که خشکی یکی از عوامل محدود کننده است که به طور قابل توجهی بر پارامترهای کیفیت کلزا تأثیر دارد (الصبغ و همکاران، ۲۰۱۶؛ الصبغ و همکاران، ۲۰۱۵). شرایط کمبود آب به‌طور معنی‌داری بر میزان روغن و عملکرد روغن و همچنین عملکرد پروتئین بذر کلزا تأثیر می‌گذارد (الصبغ و همکاران، ۲۰۱۹).

تنش خشکی همچنین می‌تواند بر ترکیب روغن بذر تأثیر بگذارد و باعث کاهش درصد روغن شود که بر کیفیت و عملکرد روغن تأثیر منفی دارد (شیرانی‌راد و زندی، ۲۰۱۲). سیناکی و همکاران (۲۰۰۷) گزارش کردند که تنش خشکی در اواخر فصل رشد، موجب کاهش درصد روغن دانه

می‌گردد. همچنین در تحقیقی دیگر تنش خشکی میزان روغن دانه را نسبت به شاهد کاهش داد (نادری و همکاران، ۱۳۸۴).

## ۲-۱-۴-۶ اسیدهای چرب

خصوصیات کیفی هر نوع روغن بستگی به ترکیب اسیدهای چرب آن دارد و کیفیت روغن دانه یکی از مهم ترین صفات برای اهداف اصلاحی جنس براسیکا در مناطق نیمه خشک می‌باشد (انجالبورت و همکاران، ۲۰۱۳). روغن کلزا حاوی یک پروفیل مطلوب از اسیدهای چرب اشباع شده (هفت درصد)، سطح بالای اسیدهای چرب غیراشباع تک باندی (حدود ۶۶ درصد) و سطح متوسط اسیدهای چرب غیراشباع چند باندی (حدود ۳۲ درصد) است (شریعتی و قاضی‌شهنی‌زاده، ۱۳۷۹). البته محققان دیگر نیز اذعان داشتند که ترکیب اسیدهای چرب روغن کلزا شامل هفت درصد اسیدهای چرب اشباع، ۶۶ درصد اسیدهای چرب تک غیر اشباع و ۲۷ درصد اسیدهای چرب چند غیر اشباعی می‌باشد و ارقام کلزا از نظر ترکیب اسیدهای چرب روغن دانه تفاوت معنی‌داری با هم دارند (کدیور و همکاران، ۱۳۸۹). اسیدهای چرب لینولئیک و لینولنیک از اسیدهای چرب غیراشباع چندباندی به شمار می‌آیند و پیوندهای دوگانه بعدی آنها نسبت به اولین پیوند دوگانه ایجادشده به سمت گروه متیل است و انسان به عنوان مصرف کننده قادر به سنتز آنها نیست و از طرف دیگر، کیفیت روغن به مقدار این اسیدهای چرب بستگی دارد که میتواند از طریق رژیم غذایی تأمین شود (محمدی، ۱۳۸۸).

کیفیت روغن کلزا معمولاً بر اساس میزان اسیدهای چرب اولئیک، لینولئیک و اروسیک تعیین می‌گردد که به میزان زیادی تحت تاثیر دما در طی دوره گلدهی تا رسیدن دانه (بریودان و اگلی، ۲۰۰۳) یا شرایط محیطی (انجالبورت و همکاران، ۲۰۱۳) و نوع رقم (جاویدفر و همکاران، ۱۳۸۶) قرار می‌گیرند. در روغن کلزا، اروسیک اسید که اشباع نشده است، حدود ۲۶-۳۰ درصد از کل اسیدهای چرب را شامل می‌شود. در صورتی که میزان اسید چرب اروسیک در روغن بالا باشد، این نوع روغن‌ها غیرخوراکی تلقی شده و در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند. اگرچه تاکنون مدارک مستندی در

مورد مضرات وجود مقادیر بالای اروسیک اسید در رژیم غذایی بر سلامت انسان ارایه نشده است، ولی مطالعات انجام شده روی حیوانات مشخص کرده که میزان بالای اروسیک اسید در جیره غذایی موجب انباشته شدن چربی‌های زنجیره بلند در قلب این جانوران شده است. مهمترین اسید چرب اشباع نشده از لحاظ تغذیه‌ای، لینولئیک اسید است چون این اسید چرب در بدن سنتز نمی‌شود و باید از طریق جیره غذایی تأمین گردد. اولئیک اسید از جمله اسیدهای چرب غیر اشباع با یک پیوند دوگانه می‌باشد که اثرات آنتی اکسیدانی آن نیز اثبات شده است (بری، ۱۹۹۷). روغن کلزا حدود ۹۲/۵-۹۰ درصد اسید چرب اشباع نشده و در حدود ۷/۵-۱۰ درصد اسیدچرب اشباع شده دارد.

تنش خشکی منجر به افزایش درصد پالمیتیک اسید و استئاریک اسید در گیاهان کلزا ( نصر و همکاران، ۱۳۸۵) و آفتابگردان (پاندی و همکاران، ۲۰۰۱) شد. نتایج حاصل از مطالعات محققان نشان می‌دهد که تنش کم آبی موجب افزایش اولئیک اسید گردید. در شرایط تنش کم آبی، نسبت درصد اسیدهای چرب اشباع به اسیدهای چرب غیراشباع در روغن دانه ارقام کلزا افزایش می‌یابد زیرا اسیدهای چرب غیراشباع از اسیدهای چرب اشباع به‌وجود می‌آیند (یانگ و همکاران، ۲۰۰۳). همچنین یانگ و همکاران (۲۰۰۳) بر کاهش درصد روغن دانه و عملکرد روغن ارقام کلزا در شرایط تنش کم آبی در مرحله گلدهی اذعان داشته‌اند، که این امر می‌تواند به دلیل اکسیداسیون برخی اسیدهای چرب غیراشباع چندگانه و کاهش قابلیت تبدیل هیدرات‌های کربن به روغن در شرایط تنش روی داده باشد. انج‌البرت و همکاران (۲۰۱۳) در بررسی گونه‌های مختلف جنس براسیکا به تنش کم آبی گزارش کردند که میزان لینولنیک اسید تحت شرایط تنش کاهش می‌یابد. همچنین در بررسی واکنش پروفیل اسیدهای چرب روغن دانه گونه‌های مختلف جنس براسیکا به تنش خشکی گزارش شده است که میزان لینولئیک اسید تحت شرایط تنش به‌طور چشمگیر کاهش یافت. در بررسی دیگر اعمال تنش خشکی از مرحله گلدهی به بعد، سبب کاهش درصد اسیدهای چرب اشباع روغن دانه (استئاریک اسید و آراشیدیک اسید) در شش رقم کلزا شد که می‌توان آن را به کوتاه شدن دوره رشد گیاه در شرایط تنش نسبت داد. همچنین گزارش شده است که اعمال تنش خشکی در مرحله گلدهی

کلزا، میزان اسیدهای چرب غیر اشباع روغن دانه نظیر لینولئیک اسید، لینولنیک اسید و گادولئیک اسید را به ترتیب ۱۶، هفت و چهار درصد در مقایسه با شرایط بدون تنش کاهش داده است (توحیدی مقدم و همکاران، ۲۰۱۱). این درحالی است که افزایش ۱/۷ تا دو درصدی اسیدهای چرب غیر اشباع چندگانه مانند لینولئیک اسید و لینولنیک اسید به همراه کاهش ۳/۸ درصدی اولئیک اسید در روغن دانه کلزا به واسطه تنش خشکی در شرایط آب و هوایی مدیترانه‌ای گزارش شده است (اسلم و همکاران، ۲۰۰۹؛ بیلز بورو و نارتون، ۱۹۸۴). در پژوهش دیگری میانگین درصد اولئیک اسید در روغن دانه ارقام کلزا را بین ۵۷ تا ۶۲ درصد ذکر شده است و محققین افزایش درصد اولئیک اسید در پروفیل اسیدهای چرب روغن دانه کلزا را در ارتباط با افزایش میزان بارندگی در طول دوره رشد گیاه دانسته‌اند (اسلم و همکاران، ۲۰۰۹). تحت شرایط تنش خشکی، میزان اسیدهای چرب اشباع روغن دانه کاهش می‌یابد که با کوتاه تر شدن طول دوره رشد در ارتباط است. علت اکسید شدن سریع کلزا وجود درصد بالایی از اسیدهای چرب غیر اشباع است که همزمان با افزایش تنش خشکی این درصد نیز افزایش می‌یابد (کوزاکی و همکاران، ۲۰۰۱).

## ۲-۱-۴-۷ فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان

پیری، تنش و تحریکات رشدی در گیاه باعث افزایش مقادیر مختلف اکسیژن فعال از قبیل: آنیون سوپراکساید، پراکسید هیدروژن، رادیکال هیدروکسیل و اکسیژن آزاد می‌شود. این ملکول‌های فعال باعث آسیب به ماکرومولکول‌ها و نیز ساختار سلولی شده یا اینکه به عنوان ملکول منفرد موجب فعال شدن سلسله پاسخ‌های دفاعی گیاه می‌شوند. در واقع تنش خشکی با تشکیل گونه‌های اکسیژن فعال باعث تنش ثانویه مانند تنش اکسیداتیو می‌شود که در نهایت باعث تغییر در مسیرهای بیوسنتز متابولیت‌های ثانویه می‌گردد (فاروق و همکاران، ۲۰۰۹؛ کشاورز و همکاران، ۲۰۱۸). گونه‌های اکسیژن فعال باعث تخریب پروتئین، پراکسیداسیون لیپیدها، قطعه قطعه شدن DNA، آسیب و مرگ سلولی می‌شود (انجم و همکاران، ۲۰۱۱؛ گیل و توتجا، ۲۰۱۰).

یکی از واکنش‌هایی که در حضور گونه‌های اکسیژن فعال سرعت بیشتری پیدا می‌کند، پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی است (تریپاتی و همکاران، ۲۰۱۷). پراکسیداسیون لیپیدی در کنار افزایش<sup>۱</sup> ROS ها می‌تواند منجر به پارگی غشاء سلولی در گیاهان در زمان تنش شود. گیاهان از دو سیستم آنزیمی و غیر آنزیمی برای دفاع در مقابل گونه‌های اکسیژن فعال استفاده می‌کنند (اسریوالی و خانا چوپرا، ۲۰۰۹؛ کشاورز و همکاران، ۲۰۱۶). سیستم آنزیمی شامل آنزیم‌های ضد اکساینده مانند کاتالاز، پراکسیداز و گلوکاتیون ردوکتاز بوده که وظیفه عمده این آنزیم‌ها تجزیه پراکسید هیدروژن می‌باشد (احمد و حداد، ۲۰۱۱؛ وینکور و آلتمن، ۲۰۰۵). فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند کاتالاز (CAT)، آسکوربات پراکسیداز (APX)، سوپراکسید دیسموتاز (SOD) و پراکسیداز (POX) در پاسخ به تنش خشکی تغییر می‌کند که در این پاسخ بین گونه‌های گیاهی متفاوت است. برای کاهش اثرات مضر تنش اکسیداتیو، گیاهان آنزیم‌هایی نظیر CAT، APX، SOD و POX را تکامل داده‌اند (اپل و هیرت، ۲۰۰۴؛ یو و چان، ۲۰۱۵). گزارش شده است که تنش خشکی می‌تواند فعالیت آنزیم‌ها را تغییر دهد (فاروق و همکاران، ۲۰۱۴). همچنین گزارش شده است که فعالیت CAT در کلم چینی<sup>۲</sup> در پاسخ به تنش آبی ناشی از قرار گرفتن در معرض ۲۴ ساعت محلول پلی اتیلن گلیکول ۲۰ درصد افزایش یافته است (سان و همکاران، ۲۰۱۰). گزارش‌ها همچنین حاکی از آن است که تنش خشکی باعث افزایش فعالیت کاتالاز در کلزای معمولی (*Brassica napus*) (توحیدی مقدم و همکاران، ۲۰۰۹؛ لطفی و همکاران، ۲۰۱۵؛ ليو و همکاران، ۲۰۱۱) و *Brassica oleracea* (وو و همکاران، ۲۰۱۲) می‌شود.

افزایش فعالیت CAT باعث کاهش پایداری غشای سلولی و تثبیت CO<sub>2</sub> برگی با کاهش سطح H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> می‌شود (لطفی و همکاران، ۲۰۱۵). کاتالاز، پراکسید هیدروژن را به آب و اکسیژن تبدیل می‌کند (سوفو و همکاران، ۲۰۰۵). افزایش فعالیت کاتالاز نشانگر مهار مؤثر پراکسید هیدروژن توسط این آنزیم است که در مطالعات یونجه (وانگ و همکاران، ۲۰۰۹) و نعناع (اوزگن و همکاران، ۲۰۰۶)

<sup>1</sup> Reactive oxygen species

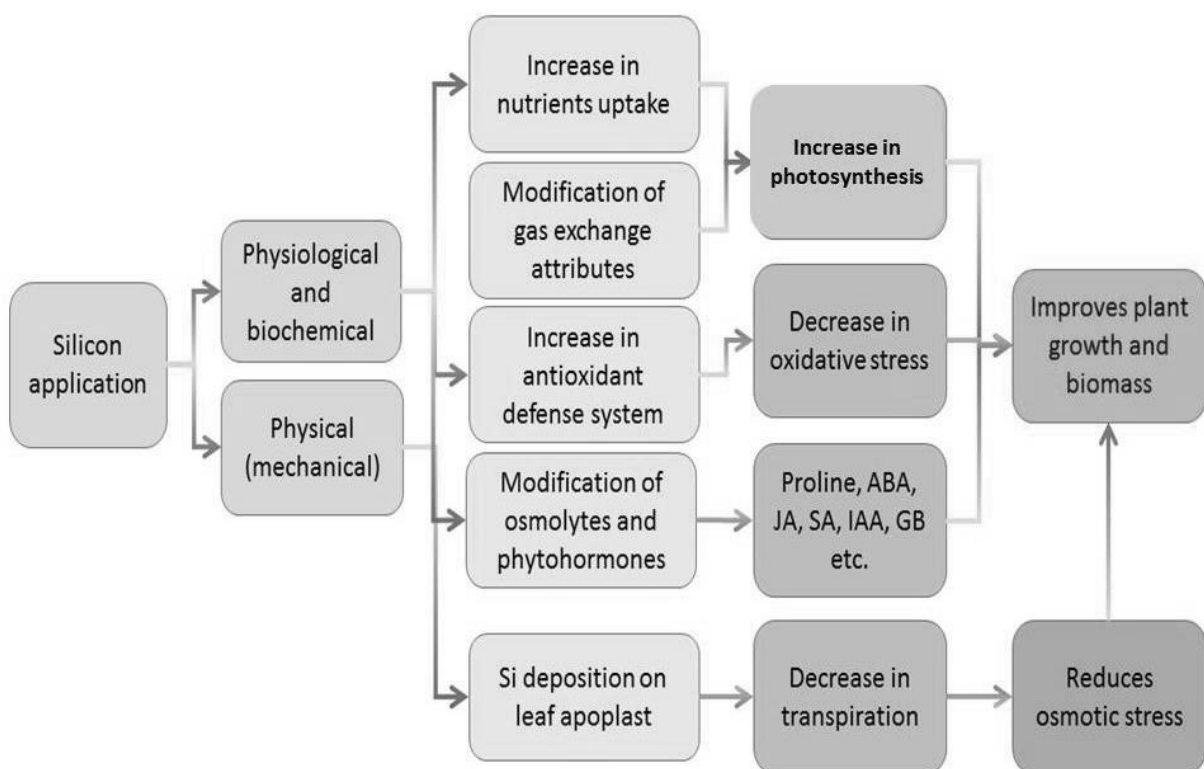
<sup>2</sup> Chinese cabbage (*Brassica rapa*)

مشاهده گردید. در سایر ارقام کلزای معمولی تنش خشکی منجر به کاهش فعالیت POX شد (توحیدی مقدم و همکاران، ۲۰۰۹). خشکی طولانی مدت باعث افزایش تولید ROS می‌شود، که عملکرد سلول را مختل می‌کند و فعالیت POX را سرکوب می‌کند. در مطالعه‌ای، فعالیت سوپراکسید دیسموتاز (SOD) در شرایط تنش افزایش یافت. خشکی طولانی مدت باعث افزایش تولید ROS می‌شود که عملکرد سلول را مختل می‌کند و منجر به سرکوب تجمع SOD در کلم‌های چینی تحت تنش خشکی شد و فعالیت آنتی اکسیدانی تغییر کرد و این حاکی از ارتباط مستقیم بین پلی‌فنول‌ها و فعالیت آنتی اکسیدانی بود (شاو و همکاران، ۲۰۲۰). تنش خشکی فعالیت سوپراکسید دیسموتاز و پراکسیداز را در ده رقم کلزا افزایش داد (عابدی و پاک‌نیت، ۲۰۱۰). آنزیم سوپراکسید دیسموتاز غلظت پراکسید هیدروژن و سوپراکسید را در سلول تنظیم می‌کند و یک عامل مهم در سیستم دفاعی گیاه در برابر تنش آنتی اکسیدان است (کشاورز و همکاران، ۲۰۱۶).

فعالیت بسیاری از آنزیم‌های آنتی اکسیدان در واکنش به تنش خشکی افزایش می‌یابد (اسفندیاری و همکاران، ۱۳۸۸؛ مانیوان و همکاران، ۲۰۰۷). آنزیم‌های آسکوربات پراکسیداز، پراکسیداز و کاتالاز وظیفه مشابهی را در سیستم دفاعی گیاه بر عهده دارند به طوری که سم‌زدایی و تجزیه پراکسید هیدروژن وظیفه این سه آنزیم در سلول است (سوفو و همکاران، ۲۰۰۵). این آنزیم‌ها نقش مهمی در افزایش مقاومت به تنش اکسیداتیو در شرایط طبیعی به عهده دارند (نورانی آزاد و چوبینه، ۱۳۸۷). محققین گزارش کردند که تنش خشکی بر فعالیت آنزیم‌های ضد اکسیداتیو مانند کاتالاز در گیاهانی از جمله گندم، جو، کنجد، سویا و کلزا موثر بوده و سبب افزایش فعالیت آن‌ها می‌شود (ژانگ و همکاران، ۲۰۰۶؛ فاضلی و همکاران، ۲۰۰۷؛ کندال و همکاران، ۲۰۰۰؛ همراهی و همکاران، ۱۳۸۷). حسن‌پور و نیکنام (۲۰۱۴) در آزمایشی گزارش دادند که فعالیت آنزیم‌های آسکوربات پراکسیداز، سوپراکسید دیسموتاز و پراکسیداز تحت تنش خشکی افزایش یافت.

## ۲-۲ ترکیبات سیلیکاتی و تنش خشکی

کاربرد برگی عناصر غذایی میکرو و ماکرو به عنوان روشی مؤثر برای بهبود جذب و افزایش سرعت جذب این عناصر توسط برگ‌ها و اندام‌های هوایی ثابت شده است، زیرا این عناصر بدون این که تحت تأثیر عوامل محدود کننده خاک در محدوده ریشه قرار گیرند، به راحتی توسط برگ‌ها و از طریق کوتیکول و روزنه‌ها جذب و با طی کوتاه‌ترین مسافت وارد دستجات آوندی، سلول‌های مزوفیل و اپوپلاست می‌شوند. خشکی معمولاً رشد گیاه و عملکرد آن را در مناطق خشک و نیمه خشک در



سرتاسر جهان کاهش می‌دهد (زاندلیناز و همکاران، ۲۰۱۸).

شکل ۲-۱- مکانیسم سیلیکون برای تحمل به خشکی در گیاهان (برگرفته از رضوان و همکاران، ۲۰۱۵؛ طیب و

همکاران، ۲۰۱۸).

اثرات منفی آن بر زیست توده گیاهی و رشد همه محصولات زراعی که در مزارع اصلی کشت می‌شوند تأثیر می‌گذارد (کاوشال و وانی، ۲۰۱۶). در مقابل، محققان مختلف ثابت کرده‌اند که ترکیبات سیلیکونی باید به عنوان یک رویکرد عملی برای غلبه بر اثرات منفی تحریک شده خشکی مطرح شود (گو و همکاران، ۲۰۱۷؛ شی و همکاران، ۲۰۱۴). مکانیسم‌ها به منظور افزایش تحمل به خشکی در گیاه با کاربرد ترکیبات حاوی سیلیکون در سطح مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی در زیر خلاصه شده است (شکل ۱-۲).

## ۲-۲-۱ بهبود دهندگی ترکیبات سیلیکاتی در رشد گیاه، زیست توده و

### فتوسنتز در شرایط تنش خشکی

زیست توده و رشد گیاه به واسطه خشکی به شدت کاهش می‌یابد (امین و همکاران، ۲۰۱۶؛ نومان و همکاران، ۲۰۱۵)، از این رو استفاده از ترکیبات دارای سیلیکون تحت تنش خشکی می‌تواند یک روش عملی برای بهبود رشد باشد. این ترکیبات می‌توانند در شرایط مؤثر جهت بهبود رشد و زیست توده در گیاهان تحت تنش خشکی مورد استفاده قرار گیرند (حاجی‌بلند و همکاران، ۲۰۱۷؛ مرواد و همکاران، ۲۰۱۸). سیلیکون جذب شده در گندم منجر به افزایش زیست توده ریشه، شاخه، وزن سنبله و وزن خشک گردید (احمد و همکاران، ۲۰۰۷؛ گونگ و همکاران، ۲۰۰۳؛ سو و همکاران، ۲۰۱۷). گزارش شد که محلول‌پاشی ترکیبات سیلیکاتی (با غلظت‌های ۰، ۸، ۱۶ و ۳۲ پی‌پی‌ام در مراحل مختلف رشدی گیاه از جمله مرحله رشد رویشی، گلدهی و توسعه بذر) بر روی گندم به شکل اسیدارتوسیلیسیک باعث بهبود طول ریشه، تراکم و رشد گردید (راتناکومار و همکاران، ۲۰۱۶). در مطالعه دیگری پرایمینگ بذر با سیلیکات سدیم در شرایط تنش خشکی ناشی از پلی اتیلن گلیکول

باعث بهبود طول ریشه و ساقه گردید (حمید و همکاران، ۲۰۱۳). به طور مشابه، سیلیکات وزن تر ریشه و ساقه را در چمن کنتاکی تحت تنش خشکی بهبود داد (بای و همکاران، ۲۰۱۷).

کاربرد ترکیبات سیلیکاتی بهترین نتیجه عملکرد دانه گندم را تحت تنش خشکی با استفاده از روش هیدروپونیک در گلدان‌ها و آزمایشات مزرعه نشان داد (احمد و همکاران، ۲۰۱۶؛ قرینه و کارملاجاب، ۲۰۱۳؛ پی و همکاران، ۲۰۱۰). پرایمینگ بذر با منابع دیگر سیلیکون باعث افزایش عملکرد دانه و طول سنبله گندم تحت تنش خشکی شد (احمد و همکاران، ۲۰۱۶). به طور مشابه، کاربرد سیلیکات پتاسیم در سورگوم منجر به بهبود وزن خشک ریشه‌ها به میزان ۳۰ درصد تحت تنش خشکی شد (احمد و همکاران، ۲۰۱۱). در تحقیق دیگری، ترکیبات سیلیکاتی به عنوان کود در مزرعه نیشکر بهترین عملکرد ساقه نیشکر، زیست توده خشک و برترین محصول را تحت تنش خشکی ارائه می‌دهد (د کامارگو و همکاران، ۲۰۱۷). کاربرد ترکیبات سیلیکاتی در خاک یا به صورت محلول پاشی در مزرعه (محلول ۱/۴۲۵ میلی مولار سیلیکون محلول در آب)، منجر به بهبود عملکرد و وزن غده‌های سیب‌زمینی در مقایسه با آبیاری مناسب گیاهان شد (پیلون و همکاران، ۲۰۱۴). در عین حال محققین دیگر نشان دادند که کاربرد سیلیکات در خاک در شرایط خشکی باعث بهبود ارتفاع بوته و عملکرد دانه برنج شد (نولا و همکاران، ۲۰۱۲؛ مورو و همکاران، ۲۰۱۵). وزن تر، خشک و طول شاخه گیاه سویا با کاربرد ترکیبات سیلیکاتی در شرایط خشکی بهبود یافت (همایون و همکاران، ۲۰۱۰). کاربرد دیاتومیت<sup>۱</sup> (نوعی خاک از بقایای فسیلی حاصل از جلبک‌های تک سلولی که در اسکلت آنها مقادیر قابل توجهی از سیلیس وجود دارد) در خاک با بهبود پارامتر رشد (طول ریشه و ساقه) و پارامترهای عملکرد (تعداد غلاف، وزن تر و خشک غلاف) در لوپن تحت تنش خشکی نتایج مؤثری را نشان داد (عبدالله، ۲۰۱۱). استفاده از ترکیبات سیلیکاتی روی دو رقم ذرت باعث افزایش

---

<sup>1</sup> Diatomaceous

ارتفاع بوته، قطر ساقه، تعداد برگ، طول دانه، عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیکی شد که در نهایت به رشد و عملکرد بهتر کمک کرد (امین و همکاران، ۲۰۱۶).

علاوه بر این، ترکیبات سیلیکاتی همچنین در شرایط خشکی تأثیرات چشمگیری بر کیفیت دانه گیاهان دارد، اما متأسفانه تحقیقات صورت گرفته محدود می‌باشد. به طور مثال، کاربرد ترکیبات سیلیکاتی (۰/۰۳ میلی مولار سدیم سلنیت؛ ۱/۵ میلی مولار سیلیکات پتاسیم) رابطه مستقیمی با میزان ترکیبات فنلی، آمیلوز و فلاونوئید دانه‌های برنج داشت و همچنین باعث افزایش لیگنین، سلولز، پکتین، کربوهیدرات، پروتئین و میزان چربی کلش برنج در شرایط خشکی شد (امام و همکاران، ۲۰۱۴). بنابراین نیاز است که مکانیزم‌های بهبود کیفیت غلات توسط کاربرد ترکیبات سیلیکاتی تحت تأثیر خشکی، خصوصاً در سطح مولکولی روشن شود. تنش خشکی عامل اصلی تحریک فتوسنتز در گیاهان است. از طرف دیگر، مطالعات مختلف نشان داده است که با جذب سیلیکون، می‌توان رنگدانه‌های فتوسنتزی را در گونه‌های مختلف گیاهی افزایش داد (حسن‌اوزمان و همکاران، ۲۰۱۸؛ مرواد و همکاران، ۲۰۱۸). کاربرد ترکیبات سیلیکاتی در گیاه گندم منجر به بهبود مقدار کلروفیل برگ (a و b) و همکاران، ۲۰۱۶) و میزان فتوسنتز شد (ستار و همکاران، ۲۰۱۷). به همین ترتیب، محققان نشان دادند که محلول‌پاشی ترکیبات سیلیکاتی باعث افزایش رنگدانه‌های فتوسنتز (کلروفیل a، b و کلروفیل کل و کاروتنوئیدها) و شاخص پایداری کلروفیل در ارقام مختلف گندم در شرایط خشکی می‌شود (مقصودی و همکاران، ۲۰۱۶). به طور مشابه، محلول‌پاشی ترکیبات سیلیکاتی بر روی گندم باعث افزایش محتوای کلروفیل برگ شد (راتناکومار و همکاران، ۲۰۱۶). کاربرد ترکیبات سیلیکاتی در گیاه کلزا منجر به حفاظت از رنگدانه‌های فتوسنتزی برگ (حسن‌اوزمان و همکاران، ۲۰۱۸) و افزایش محتوای کلروفیل کل برگ سویا در شرایط تنش خشکی شد (شن و همکاران، ۲۰۱۰). همچنین مشاهده شد که آن باعث بهبود تخصیص نور جذب شده بین فوتوسیستم یک و دو در کلروپلاست‌های برگ‌های گوجه فرنگی و حفظ ساختار غشای کلروپلاست تحت تنش خشکی شد (کأ و همکاران، ۲۰۱۵). علاوه بر این، ترکیبات سیلیکاتی باعث افزایش فتوسنتز و کلروفیل دو رقم خیار تحت تنش

خشکی شدند (اوزونیدو و همکاران، ۲۰۱۶). ترکیبات سیلیکاتی در دو رقم مختلف برنج منجر به افزایش سرعت فتوسنتز شدند که توسط کمبود آب کاهش یافته بود (مورو و همکاران، ۲۰۱۵). کاربرد ترکیبات سیلیکاتی در خاک یا محلول‌پاشی باعث افزایش غلظت کلروفیل و کاروتنوئید مشابه با گیاهان سیب زمینی خوب آبیاری شده گردید (پیلون و همکاران، ۲۰۱۴). محلول‌پاشی ترکیبات سیلیکاتی باعث افزایش چشمگیر میزان فتوسنتز خالص، رنگ سبز برگ برگ‌های چمن کنتاکی شد (سعود و همکاران، ۲۰۱۴)، در حالی که باعث افزایش راندمان فتوشیمیایی و سرعت فتوسنتزی برگ کاکائو در شرایط خشکی گردید (زانتی و همکاران، ۲۰۱۶).

اعمال ترکیبات سیلیکاتی باعث افزایش در فعالیت‌های فتوسنتزی تحت شرایط خشکی می‌گردد که موازی با افزایش فعالیت آنزیم‌های فتوسنتزیک ریبولوز بیس فسفات کربوکسیلاز و گلیسرآلدئید - ۳-فسفات دهیدروژناز می‌باشد. سیلیکون با قرار گرفتن در آپوپلاسم دیواره‌های خارجی سلول‌های اپیدرمی، علاوه بر استحکام برگ باعث تولید بافت ناهمواری در دو سطح برگ می‌شود که این امر باعث به تأخیر انداختن پیری برگ در نتیجه افزایش در محتوای کلروفیل و کاهش در میزان تعرق روزنه‌ای می‌گردد. علاوه بر این افزایش میزان کلروفیل b در تیمار سیلیکات می‌تواند به اثر آن در افزایش کارایی فتوسیستم دو اشاره کرد که توسط آل‌آقباری و همکاران (۲۰۰۴) در گیاه گوجه فرنگی که تحت تنش شوری قرار گرفته بود گزارش شده است.

## ۲-۲-۲ تنش اکسیداتیو

شرایط خشکی به رنگدانه‌های فتوسنتزی آسیب می‌زند و تعادل بین تولید ROS و آنتی‌اکسیدان‌ها را مختل می‌کند، بنابراین بر عملکرد نهایی محصول تأثیر می‌گذارد (کیم و همکاران، ۲۰۱۷). تیمار ترکیبات سیلیکاتی در گندم از طریق تنظیم فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی کاتالاز (CAT)، سوپراکسید دیسموتاز (SOD) و تنظیم کننده‌های رشد (GR)، منجر به تحمل به خشکی بیشتر شد (گونگ و همکاران، ۲۰۰۵). مکمل‌های سیلیکون در گندم نشان داد که محتوای گلوتاتیون، پراکسیداسیون

لیپیدی و فلاونوئید کل کمتر گردید، در حالی که محتوای آسکوربات با استفاده از سیلیکون افزایش یافت (ما و تاکاهاشی، ۲۰۰۲). به طور مشابه، در گیاهان گوجه‌فرنگی، کاربرد ترکیبات سیلیکاتی و تنش خشکی ناشی از پلی اتیلن گلایکول سبب افزایش فعالیت‌های CAT و SOD گردید (شی و همکاران، ۲۰۱۴). علاوه‌براین، ترکیبات سیلیکاتی فعالیت آسکوربات پراکسیداز (APX) را تحت شرایط خشکی در آفتابگردان کاهش داد (گونس و همکاران، ۲۰۰۸). تنش خشکی در گیاهان تولید ROS کرده که باعث آسیب تنش اکسیداتیو می‌شود (فوکاو و همکاران، ۲۰۱۱؛ نومن و همکاران، ۲۰۱۵). پژوهش‌های گوناگون نشان داد که تأمین سیلیکون فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان را افزایش می‌دهد، در حالی که باعث کاهش آسیب تنش اکسیداتیو در گیاهان می‌گردد که می‌تواند برای توسعه تحمل به خشکی گیاه کافی باشد (بای و همکاران، ۲۰۱۷؛ حاجی‌بلند و همکاران، ۲۰۱۷؛ ما و همکاران، ۲۰۱۶). کاربرد ترکیبات سیلیکاتی در شرایط تنش خشکی منجر به کاهش پراکسیداسیون لیپیدها و پراکسید هیدروژن در گیاهان زراعی آفتابگردان، نخود (گونس و همکاران، ۲۰۰۷؛ گونس و همکاران، ۲۰۰۸) و عدس (بیجو و همکاران، ۲۰۱۷) شد. به‌طور مشابه،  $H_2O_2$  و پراکسیداسیون لیپیدها در کلزا (حسن‌اوزمان و همکاران، ۲۰۱۷) و محتوای  $H_2O_2$  در تنباکو (حاجی‌بلند و همکاران، ۲۰۱۷) و برگ‌های گندم (گونگ و همکاران، ۲۰۰۸؛ ما و همکاران، ۲۰۱۶) در شرایط استفاده از ترکیبات سیلیکاتی در شرایط تنش خشکی نیز کاهش یافت. ژو و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند که استفاده از سیلیکات‌پتاسیم به میزان قابل توجهی منجر به کاهش  $H_2O_2$ ، محتوای مالون‌دی‌آلدئید و افزایش فعالیت سوپراکسید دیسموتاز در برگ‌های گندم در طول دوره خشکی گردید. شی و همکاران (۲۰۱۴) نشان دادند که ترکیبات سیلیکاتی باعث بهبود سوپراکسید دیسموتاز (SOD)، فعالیت کاتالاز (CAT) و  $H_2O_2$  گوجه‌فرنگی، نسبت به نهال‌های بدون تیمار سیلیکات می‌شود. به طور مشابه، عرضه سیلیکون باعث افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی از جمله SOD، CAT و کاهش محتوای  $H_2O_2$  و MDA در گوجه‌فرنگی شد (کائو و همکاران، ۲۰۱۷). علاوه بر این، ترکیبات سیلیکاتی به طور قابل توجهی فعالیت پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز را در گیاه کلزا افزایش داد (حبیبی، ۲۰۱۴). فعالیت

آنزیم‌های آنتی اکسیدان (به عنوان مثال: SOD و CAT) در گندم (*T. aestivum*) (ستار و همکاران، ۲۰۱۷)، لوبیا چشم بلبلی (*V. unguiculata*) (مرواد و همکاران، ۲۰۱۸) و سیبزمینی (*S. tuberosum*) (پیلون و همکاران، ۲۰۱۴) با کاربرد محلول پاشی ترکیبات سیلیکاتی افزایش یافت.

# فصل سوم: مواد و روش ها

## ۳-۱ زمان آزمایش و خصوصیات اقلیمی و جغرافیایی محل اجرای آزمایش

آزمایش به مدت دو سال زراعی (۹۵-۹۶ و ۹۶-۹۷) در موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج با موقعیت طول جغرافیایی  $56^{\circ}$  و  $50^{\circ}$  شرقی و عرض جغرافیایی  $47^{\circ}$  و  $35^{\circ}$  شمالی و ارتفاع ۱۱۶۰ متر از سطح دریا اجرا گردید. براساس میانگین داده‌های سی ساله هواشناسی کرج، متوسط بارندگی سالیانه منطقه ۲۴۳ میلی‌متر بوده و بارندگی‌ها عمدتاً در اواخر پاییز و اوایل بهار روی می‌دهد. براساس منحنی‌های آمبروترمیک و آمارهای هواشناسی، منطقه مورد نظر با داشتن ۱۸۰-۱۵۰ روز و گاهی تا ۲۰ روز خشکی جزء مناطق آب و هوایی مدیترانه ایی گرم و خشک و با داشتن زمستان سرد و مرطوب و تابستان گرم و خشک جزء مناطق نیمه خشک محسوب می‌شود. آمار هواشناسی محل آزمایش در طی دو سال زراعی در جدول ۳-۱ ارائه شده است.

جدول ۳-۱- میانگین ماهانه بارش (میلی‌متر) و دما (سانتی‌گراد) در طول فصل رشد (۹۵-۹۷)

| خرداد | اردیبهشت | فروردین | اسفند | بهمن | دی   | آذر  | آبان  | مهر   | ماه         |
|-------|----------|---------|-------|------|------|------|-------|-------|-------------|
| ۱۳۹۶  | ۱۳۹۶     | ۱۳۹۶    | ۱۳۹۵  | ۱۳۹۵ | ۱۳۹۵ | ۱۳۹۵ | ۱۳۹۵  | ۱۳۹۵  | سال         |
| ۲۱/۹۴ | ۱۲/۱۱    | ۲۰/۲۷   | ۲/۵۴  | ۳/۶۷ | ۴/۶۷ | ۸/۱۳ | ۱۶/۵۸ | ۱۸/۸۵ | بارش        |
| ۲۶/۱  | ۲۱/۲     | ۱۳/۳    | ۶/۴   | ۷/۱  | ۵/۲  | ۵/۹  | ۹/۳   | ۱۶/۸  | میانگین دما |
| خرداد | اردیبهشت | فروردین | اسفند | بهمن | دی   | آذر  | آبان  | مهر   | ماه         |
| ۱۳۹۷  | ۱۳۹۷     | ۱۳۹۷    | ۱۳۹۷  | ۱۳۹۶ | ۱۳۹۶ | ۱۳۹۶ | ۱۳۹۶  | ۱۳۹۶  | سال         |
| ۰     | ۱۵/۳     | ۵۲/۵    | ۱۶/۸  | ۷/۷  | ۱۰/۶ | ۲۴/۶ | ۳۸/۴  | ۲۲/۸۵ | بارش        |
| ۲۳/۴  | ۱۹/۹     | ۱۱/۷    | ۱۰/۸  | ۵/۱  | ۵/۱  | ۴/۶  | ۱۰/۵  | ۱۸/۴  | میانگین دما |

## ۳-۲ مشخصات خاک محل آزمایش

برای ارزیابی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آزمایش قبل از تهیه زمین از چند نقطه از عمق صفر تا ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متر نمونه برداری انجام شد و پس از تهیه نمونه مرکب جهت ارزیابی خصوصیات

فیزیکی و شیمیایی به آزمایشگاه ارسال گردید. بافت خاک مزرعه، لومی بود و مشخصات خاک محل آزمایش در جدول ۲-۳ ارائه شده است.

جدول ۲-۳- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش در عمق های ۰-۳۰ و ۳۰-۶۰ سانتی متر در طول دو سال زراعی (۹۵-۹۷)

| عمق خاک (سانتی متر)         | ۳۰-۶۰ | ۰-۳۰ | عمق خاک (سانتی متر)    | ۳۰-۶۰ | ۰-۳۰ |
|-----------------------------|-------|------|------------------------|-------|------|
| اسیدیت کل اشباع             | ۷/۵   | ۷/۱  | مگنیز قابل جذب (mg/kg) | ۳/۳۴  | ۴/۰۲ |
| هدایت الکتریکی خاک (dS.m-1) | ۱/۱۳  | ۲/۰۵ | روی قابل جذب (mg/kg)   | ۱     | ۰/۵  |
| کربن آلی (%)                | ۰/۴۶  | ۰/۴۶ | مس قابل جذب (mg/kg)    | ۰/۷   | ۰/۶  |
| فسفر قابل جذب (mg/kg)       | ۱۴/۷  | ۱۲/۶ | درصد رس (%)            | ۲۷    | ۲۴   |
| پتاسیم قابل جذب (mg/kg)     | ۱۶۴   | ۱۹۸  | درصد سیلت (%)          | ۳۴    | ۳۶   |
| آهن قابل جذب (mg/kg)        | ۴/۹۰  | ۳/۸۲ | درصد شن (%)            | ۳۹    | ۴۰   |
| درصد نیتروژن کل (%)         | ۰/۰۹  | ۰/۰۹ | بافت خاک               | لومی  | لومی |

### ۳-۳ خصوصیات طرح آزمایشی

این تحقیق به صورت فاکتوریل اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک های کامل تصادفی با سه تکرار انجام گرفت. در این آزمایش عامل آبیاری در دو سطح آبیاری معمول (شاهد) و قطع آبیاری از مرحله خورجین دهی به بعد و عامل محلول پاشی در دو سطح (محلول پاشی با چهار گرم در لیتر سیلیکات پتاسیم و عدم محلول پاشی) به صورت فاکتوریل در کرت های اصلی و ژنوتیپ های بهاره کلزا شامل؛ DALGAN، RGS003، RGS×OKAPI، RGS×SLM و OG×AL در کرت های فرعی (DALGAN به عنوان رقم شاهد) قرار گرفتند.

کاشت در تاریخ ۱۵ مهر ماه صورت گرفت. هر کرت آزمایشی شامل شش خط شش متری با فاصله خطوط ۳۰ سانتی متر و فاصله بوته روی خط چهار سانتی متر بود که دو خط کناری به عنوان

حاشیه در نظر گرفته شد. دور آبیاری براساس ۸۰ میلی متر 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 اندازه گیری شد. تعداد دفعات آبیاری در تیمارهای شاهد و قطع آبیاری از مرحله خورجین دهی به بعد به ترتیب ۸ و ۶ مرتبه بود. همچنین میزان آب مصرفی در تیمارهای مذکور به ترتیب برابر با ۵۱۲۰ و ۳۸۴۰ متر مکعب در هکتار بود. زمان محلول پاشی سیلیکات پتاسیم بعد از خروج از مرحله رزت طی دو مرحله با فاصله ۱۰ روز صورت گرفت. انتخاب این مرحله محلول پاشی به این دلیل بود که در طی مرحله گلدهی و اوایل خورجین دهی کلزا حساسیت زیادی به کم آبی دارد و هدف بررسی امکان کاهش اثرات تنش خشکی آخر فصل با استفاده از سیلیکات پتاسیم بود. محلول پاشی برگ توسط سیلیکات پتاسیم در مرحله رزت و به میزان چهار گرم در لیتر از منبع سیلیکات پتاسیم به وسیله دستگاه سمپاش انجام شد. برای تیمارهای شاهد نیز همان حجم آب بدون سیلیکات پتاسیم توسط سمپاش بر روی برگ ها آب پاشی شد. برای این منظور پس از کالیبراسیون دستگاه سمپاش با توجه به مساحت زمین و پس از محاسبه میزان محلول مورد نیاز، محلول پاشی بر روی سطح گیاه انجام شد.

### ۳-۴ مراحل تهیه بستر کشت

به منظور آماده سازی بستر کشت، قبل از اجرای آزمایش، زمین مورد نظر آبیاری گردید و پس از گاورو شدن، به وسیله گاواهن برگردان دار شخم زده شد. سپس جهت خرد شدن کلوخ ها و همچنین یکنواخت شدن وضعیت خاک مزرعه، زمین مذکور دیسک و ماله زده شد. سپس اقدام به نمونه گیری از خاک مزرعه در دو عمق ۰-۳۰ و ۳۰-۶۰ سانتی متر گردید. براساس نتایج تجزیه خاک جدول (۳-۲)، اقدام به کود پاشی، حدود یک سوم کود نیتروژن دار (۱۵۰ کیلوگرم در هکتار) و تمامی کود فسفات مورد نیاز (کود فسفات از منبع سوپر فسفات تریپل بر اساس آزمون خاک انجام شده به میزان ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار) گردید. پخش علف کش ترفلان به میزان ۲/۵ لیتر در هکتار به طور یکنواخت

در سطح مزرعه گردید و به وسیله دیسک سبک، کود و علفکش با خاک مخلوط شدند. جهت استفاده بهینه از نیتروژن، بقیه کود نیتروژن دار مورد نیاز (۲۰۰ کیلوگرم در هکتار) به صورت سرک در مرحله شروع ساقه رفتن و ظهور اولین غنچه‌های گل مصرف شد. تراکم نهایی در هر متر مربع ۶۷ بوته (یا ۶۷۰۰۰۰ بوته در هکتار) شد. برای جلوگیری از غرقاب شدن مزرعه و مخلوط شدن کودها، زهکش‌هایی در فاصله بین تکرارها به عرض ۳۰ سانتی‌متر و عمق ۴۰ سانتی‌متر ایجاد شد. مقدار بذر در هکتار ۱۰ کیلوگرم در هکتار در نظر گرفته شد. پس از عملیات کاشت مطابق نقشه آزمایش و سبز شدن و استقرار گیاهچه، عملیات داشت شامل کنترل احتمالی آفات به ویژه شته مومی با استفاده از سموم متاسیستوکس (۱/۵ لیتر در هکتار) و اکتاین (۱ لیتر در هکتار) صورت گرفت.

### ۳-۵ صفات نمونه برداری و اندازه‌گیری شده

از هر کرت آزمایشی چهار خط میانی آن برای تعیین کلیه مراحل فنولوژیک گیاه و صفات مختلف مانند ارتفاع بوته، قطر ساقه، تعداد شاخه در بوته، تعداد خورجین در بوته، طول خورجین، تعداد دانه در خورجین، وزن هزار دانه، عملکرد دانه، درصد روغن دانه، عملکرد روغن دانه، عملکرد ماده خشک و شاخص برداشت مورد استفاده قرار گرفت.

علاوه بر این، صفات کیفی نظیر میزان گلوکوزینولات دانه، میزان پرولین برگ در مرحله خورجین‌دهی، محتوای نسبی آب برگ (LRWC)، دمای کانوپی، میزان کلروفیل a در مرحله خورجین‌دهی، میزان کلروفیل b در مرحله خورجین‌دهی، میزان کلروفیل کل در مرحله خورجین‌دهی، مقاومت روزنه‌ای و ترکیب اسیدهای چرب (اولئیک، لینولئیک و اروسیک)، میزان فعالیت آنزیم‌های سوپر اکسید دیسموتاز، کاتالاز و پراکسیداز به عنوان شاخص‌های مقاومت به تنش خشکی اندازه‌گیری شد.

### ۳-۵-۱ صفات مورفولوژیکی

صفات مورفولوژیک مورد ارزیابی شامل ارتفاع بوته، قطر ساقه، تعداد شاخه در بوته، طول خورجین بود.

### ۳-۵-۲ صفات مربوط به عملکرد و اجزا عملکرد

شامل تعداد خورجین در بوته، تعداد دانه در خورجین، وزن هزار دانه، عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک و شاخص برداشت بود.

### ۳-۵-۳ صفات فیزیولوژیکی

صفات فیزیولوژیک مورد ارزیابی شامل محتوی نسبی آب، مقاومت روزه‌ای و دمای کانوپی بود.

### ۳-۵-۴ صفات بیوشیمیایی

صفات بیوشیمیایی مورد ارزیابی شامل کلروفیل کل برگ، کلروفیل a، کلروفیل b، پرولین، کربوهیدرات محلول برگ، درصد روغن دانه، عملکرد روغن دانه، گلیکوزینولات، اسیدهای چرب و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان بود.

### ۳-۶-۲ روش اندازه‌گیری صفات

در طول دوره رشد گیاه، یادداشت‌برداری از صفات عملکرد و اجزا عملکرد، مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی به عمل آمد که در ذیل نحوه یادداشت‌برداری از این صفات تشریح می‌گردد.

### ۳-۶-۱ ارتفاع بوته

به منظور تعیین ارتفاع بوته تعداد ۱۰ بوته از هر کرت آزمایشی در زمان رسیدگی فیزیولوژیکی به صورت تصادفی انتخاب و ارتفاع بوته از یقه تا انتهای گل‌آذین برحسب سانتی‌متر اندازه‌گیری شد و میانگین آن‌ها به عنوان ارتفاع بوته ثبت شد.

### **۳-۶-۲ قطر ساقه**

با استفاده از کولیس، قطر میان‌گره سوم از پایین ساقه‌ی ۱۰ بوته مورد نظر اندازه‌گیری شد و میانگین آن‌ها به عنوان قطر ساقه ثبت شد.

### **۳-۶-۳ تعداد شاخه در بوته**

تعداد شاخه‌هایی که مستقیماً از ساقه اصلی ۱۰ بوته مذکور منشعب شده بودند شمارش گردید و میانگین آن‌ها به عنوان تعداد شاخه در بوته منظور شد.

### **۳-۶-۴ تعداد خورجین در بوته**

به منظور تعیین این صفت، تعداد کل خورجین در گیاه از مجموع تعداد خورجین‌های پر و پوک در ساقه اصلی و شاخه‌های فرعی در ۱۰ بوته انتخاب شده به صورت تصادفی به دست آمد و میانگین آن برای هر کرت ثبت شد.

### **۳-۶-۵ طول خورجین**

تعداد ۵۰ عدد خورجین از ۱۰ بوته مورد نظر به طور تصادفی انتخاب شد و طول آن‌ها اندازه‌گیری گردید و میانگین آن‌ها به عنوان طول خورجین در نظر گرفته شد.

### **۳-۶-۶ تعداد دانه در خورجین**

تعداد دانه‌های ۵۰ عدد خورجین انتخابی از ۱۰ بوته مورد نظر شمارش گردید و میانگین آنها به عنوان تعداد دانه در خورجین ثبت شد.

### ۳-۶-۷ وزن هزار دانه

برای اندازه‌گیری وزن هزار دانه، پنج تکرار صد تایی از هر تیمار جدا و پس از توزین با ترازوی دقیق میانگین آنها به عنوان وزن هزار دانه هر کرت بر حسب گرم تعیین شد.

### ۳-۶-۸ عملکرد بیولوژیکی

در زمان رسیدگی فیزیولوژیکی، بوته‌های هر کرت آزمایشی پس از حذف خطوط حاشیه و همچنین نیم متر از بالا و پایین، در مساحت  $3/8$  متر مربع کف بر شدند و در دو دسته جداگانه داخل آن کرت آزمایشی به مدت چهار روز در هوای آزاد قرار گرفتند تا رطوبت بوته‌ها به ۱۲ درصد کاهش یافت، سپس با ترازوی دقیق توزین شدند و به عنوان عملکرد بیولوژیکی هر کرت آزمایشی منظور گردیدند و در نهایت عملکرد بیولوژیکی بر حسب کیلوگرم در هکتار محاسبه شد.

### ۳-۶-۹ عملکرد دانه

پس از محاسبه عملکرد بیولوژیکی هر کرت آزمایشی، جهت جدا نمودن دانه‌ها از داخل خورجین‌ها، بوته‌های کف بر شده وارد خرمن‌کوب گردیدند و دانه‌ها جدا شدند. سپس در داخل کیسه پارچه‌ای ریخته شدند و پس از تمیز کردن با استفاده از ترازوی دقیق آزمایشگاهی وزن شدند و به این ترتیب عملکرد دانه هر کرت آزمایشی محاسبه شد و در نهایت عملکرد دانه بر حسب کیلوگرم در هکتار تعیین شد.

### ۳-۶-۱۰ شاخص برداشت

با تقسیم عملکرد دانه هر کرت آزمایشی بر حسب کیلوگرم در هکتار بر عملکرد بیولوژیکی آن کرت بر حسب کیلوگرم در هکتار، شاخص برداشت محاسبه شد. که عدد حاصل در ضریب ۱۰۰ ضرب شده و شاخص برداشت بر حسب در صد تعیین شد.

### ۳-۶-۱۱ درصد روغن دانه

برای اندازه‌گیری درصد روغن دانه‌ها از هر کرت آزمایشی حدود سه گرم بذر تهیه شد که با دستگاه NMR مدل Mq20 مشخص گردید. این دستگاه بر اساس القای مغناطیسی هسته اتم هیدروژن کار می‌کند و یک روش اسپکترومتری می‌باشد. از امتیازات این روش، سرعت و دقت بالا در اندازه‌گیری روغن دانه‌ها است. القای مغناطیسی نسبتاً قوی خارجی توسط امواج رادیویی پالسی صورت می‌گیرد. بدین صورت که با قرار دادن سه گرم نمونه آسیاب شده در یک 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 ارسال شده توسط امواج رادیویی، پروتون‌های سطوح پایین به سطوح بالا برانگیخته می‌شوند. میزان جذب انرژی رادیویی مورد سنجش قرار گرفت و به میزان روغن دانه ارتباط داده شد.

### ۳-۶-۱۲ عملکرد روغن دانه

از حاصل ضرب عملکرد دانه بر حسب کیلوگرم در هکتار در درصد روغن دانه، عملکرد روغن دانه بر حسب کیلوگرم در هکتار تعیین شد.

### ۳-۶-۱۳ محتوای نسبی آب برگ

برای اندازه‌گیری محتوای نسبی آب برگ (LRWC) در ساعت ۱۱ صبح سه برگ جوان و توسعه یافته از بالای پوشش گیاهی از سه ردیف میانی هر کرت برداشت گردید و در کیسه‌های پلی‌اتیلنی و در ظرف محتوی یخ قرار داده شد. سپس نمونه‌ها بلافاصله به آزمایشگاه منتقل شد و وزن تر برگ

(FW) اندازه‌گیری شد. جهت اندازه‌گیری وزن تورژسانس، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در درون ظروف شیشه‌ای درب‌دار حاوی آب مقطر در دمای محیط قرار گرفتند و سپس با گرفتن آب روی برگ‌ها با کاغذ خشک‌کن، وزن آماس آن‌ها اندازه‌گیری شد (TW). پس از آن نمونه‌های وزن شده به مدت ۴۸ ساعت درون پاکت‌های کاغذی در آون (۷۰ درجه سانتی‌گراد) قرار گرفت، تا کاملاً خشک شدند و در نهایت وزن نمونه‌های خشک یادداشت گردید و درصد محتوای نسبی آب برگ با معادله زیر محاسبه شد (رودرینگز و همکاران ۲۰۰۲).

$$\text{LRWC} = (FW - DW) / (TW - DW) \times 100 \quad \text{رابطه (۱-۳):}$$

که در آن: LRWC = محتوای نسبی آب برگ

FW = وزن تر برگ

TW = وزن برگ آماس شده

DW = وزن خشک برگ می‌باشد.

### ۳-۶-۱۴ مقاومت روزنه‌ای

میزان مقاومت روزنه‌ای در ساعت ۱۱ صبح توسط دستگاه پرومتر (مدل Delta-T AP4, Delta-T Devices, Cambridge, UK) اندازه‌گیری شد. برای این منظور قسمت میانی چند برگ جوان و توسعه یافته در هر تکرار در محفظه دستگاه قرار گرفت و پس از تأیید دستگاه، عدد دستگاه یادداشت شد. اندازه‌گیری بعد از تنش بر روی برگ‌های بالغ (سومین برگ از راس بوته‌ها) انجام گرفت. استانداردهای لازم مطابق با راهنمای کاربران سیستم انجام و واحد آن ثانیه بر سانتی‌متر انتخاب گردید. در نهایت با تطبیق پارامترهای حاصل از صفحات کالیبراسیون توسط نرم افزارهای رایانه دستگاه، مقدار مقاومت روزنه‌ای برگ اندازه‌گیری شد.

### ۳-۶-۱۵ دمای کانوپی

اندازه گیری دمای کانوپی با استفاده از دماسنج مادون قرمز با ضریب گسیلندگی ۰/۹۹ صورت گرفت. همزمان با ثبت دمای کانوپی، دمای هوا با استفاده از یک دماسنج معمولی اندازه گیری شد. از اختلاف میان دمای کانوپی و هوا،  $\Delta T$  محاسبه گردید (عزیزی، ۱۳۷۷). روش ثبت دمای کانوپی به این صورت بود که ابتدا در هر کرت چهار نقطه به طور تصادفی انتخاب و دمای پوشش گیاهی برای آن‌ها ثبت شد، سپس دمای میانگین برای هر کرت محاسبه شد.

### ۳-۶-۱۶ کلروفیل برگ

به منظور تعیین غلظت میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی نظیر کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل در مرحله خورجین‌دهی، روش آرنون (۱۹۴۹) مورد استفاده قرار گرفت. به این منظور ۱۰۰ میلی گرم از بافت‌تر برگ‌های جوان و توسعه یافته بالای پوشش گیاهی قطع و بلافاصله توسط نیتروژن مایع فریز گردید. سپس مقدار رنگیزه‌های فتوسنتزی در هر نمونه با استفاده از استن ۸۰ درصد ساییده شد. محلول حاصل به لوله‌های سانتریفیوژ انتقال و بقایای موجود در هاون، با مقداری استن ۸۰ درصد شسته و به محلول درون لوله اضافه گردید. سپس لوله‌ها به مدت ۱۰ دقیقه در دستگاه سانتریفیوژ با سرعت ۶۰۰۰ دور در دقیقه قرار داده شد. سپس محلول فوقانی لوله‌ها جدا گردیده و به بالن ژوژه ۲۵ میلی لیتری انتقال یافت و حجم آن توسط استن ۸۰ درصد به ۲۵ میلی لیتر رسید. اندازه‌گیری غلظت کلروفیل با دستگاه اسپکتروفتومتر انجام گرفت، به این ترتیب که مقدار جذب محلول‌ها در طول موج ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر قرائت شد و مقدار کلروفیل a، b بر اساس معادله‌های زیر محاسبه گردید.

رابطه (۲-۳):

$$\text{میلی گرم کلروفیل a در هر گرم وزن تر} = [(\text{جذب در } ۶۴۵ \text{ نانومتر}) - ۲/۶۹ (\text{جذب در } ۶۶۳ \text{ نانومتر})] \times ۱۲/۷$$

رابطه (۳-۳):

میلی گرم کلروفیل b در هر گرم وزن تر = [(جذب در ۶۶۳ نانومتر) ۴/۶۹ - (جذب در ۶۴۵ نانومتر) ۲۲/۹]

رابطه (۴-۳):

میلی گرم کلروفیل a و b در هر گرم وزن تر = [(جذب در ۶۶۳ نانومتر) ۸/۰۲ - (جذب در ۶۴۵ نانومتر) ۲۰/۲]

### ۳-۶-۱۷ پرولین

برای اندازه گیری پرولین ابتدا مواد و محلول های مورد نیاز واکنش گر ها به روش ذیل تهیه گردید:

✓ اسید فسفریک شش مولار: ۴۱/۱۸ میلی لیتر اسید فسفریک ۸۵ درصد با دانسیته ۱/۶۸ کیلوگرم بر لیتر به آب مقطر اضافه شد و سپس حجم نهایی به ۱۰۰ میلی لیتر رسید (چنانچه دانسیته اسید فسفریک ۱/۷۱ کیلوگرم بر لیتر باشد نیاز به ۴۰/۴۶ میلی لیتر اسید فسفریک است).

✓ اسید سولفوسالسیلیک سه درصد: سه گرم پودر اسید سولفوسالسیلیک در آب مقطر حل شد، سپس حجم نهایی به ۱۰۰ میلی لیتر رسید.

✓ اسید ناین هایدرین: مقدار ۱/۲۵ گرم پودر اسید ناین هایدرین در ۳۰ میلی لیتر اسیداستیک گلاسیال حل گردید و سپس ۲۰ میلی لیتر اسید فسفریک شش مولار آماده شده به آن اضافه گردید. محلول حاضر به کمک هیتر استیرر و مگنت گرما دید و به خوبی به هم زده شد تا محلولی کاملاً یکنواخت به دست آمد. در هنگام گرم کردن به منظور جلوگیری از تبخیر، در ظرف با پارافیلیم بسته شد. این واکنشگر را می توان تنها به مدت ۲۴ ساعت در دمای چهار درجه سانتی گراد نگهداری کرد.

✓ استانداردهای ۱۰۰ میلی گرم در لیتر پرولین: ۰/۰۱ گرم پرولین در آب مقطر حل شد و در بالن حجمی به حجم نهایی ۱۰۰ میلی لیتر رسید (به صورت تازه تهیه شد و در یخچال نگهداری گردید).

✓ استانداردهای صفر، چهار، هشت، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ میلی گرم در لیتر پرولین: به ترتیب مقادیر صفر، دو، چهار، شش، هشت و ۱۰ میلی لیتر از محلول استاندارد ۱۰۰ میلی گرم در لیتر پرولین برداشته شد و با آب مقطر در بالن حجمی به حجم ۵۰ میلی لیتر رسید.

سپس اندازه گیری میزان پرولین براساس روش بیتس و همکاران (۱۹۷۳) طبق مراحل زیر انجام شد:

۱- ابتدا ۰/۱ گرم ماده تر گیاهی با هاون له شد و درون یک تیوب (فالكون ۱۵ میلی لیتری) ریخته شد.

۲- ۱۰ میلی لیتر اسید سولفوسالسیلیک سه درصد به هر نمونه اضافه شد و نمونه ها درون حمام آب یخ به مدت ۱۰ دقیقه قرار داده شد.

۳- تیوب ها با سرعت ۱۵۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه در دمای چهار درجه سانتی گراد سانتریفیوژ شد تا مواد اضافی از محلول جدا گردید.

۴- مقدار دو میلی لیتر از روشناور ناشی از سانتریفیوژ (یا عصاره صاف شده توسط کاغذ صافی) درون تیوب ۱۵ میلی لیتر جدید ریخته شد و دو میلی لیتر اسید ناین هایدرین و دو میلی لیتر اسید استیک گلاسیال به آن اضافه شد و سپس خوب مخلوط گردید (به مدت ۲۰ ثانیه ورتکس شد).

۵- همزمان مقدار دو میلی لیتر از استانداردهای صفر، چهار، هشت، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ میلی گرم در لیتر پرولین درون تیوب های جدید ریخته شد و دو میلی لیتر اسید ناین هایدرین و دو میلی لیتر اسید استیک گلاسیال به آن اضافه شد و سپس خوب مخلوط گردید.

۶- در مرحله بعدی نمونه های اصلی و استاندارد در حمام آب گرم در دمای ۹۵ تا ۱۰۰ درجه سانتی گراد (یا داخل رک داغ) به مدت یک ساعت قرار گرفت و بلافاصله درون حمام آب یخ قرار داده شد تا کاملاً سرد شدند و واکنش متوقف گردید.

۷- سپس چهار میلی لیتر تولوئن به هر نمونه اضافه شد و نمونه‌ها بلافاصله به مدت ۳۰ ثانیه ورتکس خواهند تا دو فاز شدند.

۸- پس از آن نمونه‌ها در دمای محیط قرار گرفتند تا با دمای آزمایشگاه هم دما شدند.

۹- سپس دستگاه اسپکتروفتومتر با استفاده از محلول بلانک (تولوئن) صفر شد.

۱۰- پس از آن ابتدا پرولین محلول در فاز تولوئن (روشناور) مربوط به شش محلول استاندارد به ترتیب و در اندازه کافی در کووت دستگاه اسپکتروفتومتر ریخته شد، به طوری که دو سوم تا سه چهارم فضای کووت پر شد، آنگاه مقدار جذب در طول موج ۵۲۰ نانومتر قرائت گردید. ضمن تعریف معادله رگرسیون، منحنی استاندارد رسم گردید و ضریب تبیین معادله رگرسیون در حد قابل قبول و بالای ۹۹ درصد بود. برای هر بار قرائت نمونه بعدی، نسبت به شستشوی کووت با محلول بلانک (تولوئن) اقدام شد.

۱۱- در مرحله بعدی میزان جذب در فاز بالایی نمونه‌های گیاهی در طول موج ۵۲۰ نانومتر قرائت شد و مقدار پرولین هر نمونه بر حسب میلی گرم بر لیتر به دست آمد. با توجه به استفاده از ۰/۱ گرم ماده‌تر و رقیق نمودن برخی نمونه‌ها و نظر به اینکه محتوای پرولین بر حسب میکروگرم بر گرم وزن تر بیان می‌گردد از معادله زیر جهت تعیین محتوای واقعی پرولین نمونه‌ها استفاده گردید:

رابطه (۳-۵):

$$\text{محتوای پرولین} = \text{ضریب رقت} \times \text{حجم بافر (میلی لیتر)} \times (\text{وزن نمونه گیاهی}) \times \frac{1}{\frac{\text{عدد قرائت شده}}{1000}}$$

### ۳-۶-۱۸ کربوهیدرات محلول برگ

جهت اندازه‌گیری کربوهیدرات‌های محلول برگ نمونه‌های منجمد به میزان ۰/۲ گرم در سه میلی‌لیتر آب مقطر عصاره‌گیری شدند و سپس محلول همگن حاصل به کمک کاغذ صافی صاف گردید. برای اندازه‌گیری قند نمونه، به ۵۰ میکرولیتر از همگن صاف شده 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 صفر تا هشت میلی‌گرم در میلی‌لیتر ترسیم گردید. جذب استانداردها به همراه جذب قند نمونه‌ها با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر در طول موج ۴۹۰ نانومتر اندازه‌گیری شد و مقدار قند نمونه، بر مبنای وزن‌تر نمونه بیان شد (دوبوئیس و همکاران، ۱۹۵۶).

### ۳-۶-۱۹ گلوکوزینولات

میزان کل گلوکوزینولات موجود در دانه های کلزا با استفاده از روش کروماتوگرافی مایع با استفاده از دستگاه High performance liquid chromatography (HPLC) اندازه‌گیری شد. در این راستا از روش اقتصادی و کارای ارائه شده توسط کاوشیک و آگنی هوتری (۱۹۹۹) استفاده شد.

### ۳-۶-۲۰ پروفیل اسیدهای چرب

در این تحقیق ترکیب اسیدهای چرب روغن به درصد تعیین شد.

الف) روش تهیه متیل استر اسیدهای چرب (ISO 5509): پس از استخراج روغن به روش سوکسیله، ۰/۷۵-۰/۵ گرم روغن داخل بالون ۱۰۰ سی‌سی وزن نموده و هشت سی‌سی هیدروکسید سدیم متانولی به همراه سنگ جوش به بالون اضافه شد. پس از اتصال مبرد محتوی بالون تا ناپدید شدن قطرات چربی در زیر مبرد جوشانیده شد. در طی مدت صابونی‌کردن، به مدت چند دقیقه نیتروژن از محلول عبور داده شد. نه سی‌سی محلول BF<sub>3</sub> متانولی از بالای مبرد (Condenser) به مایع جوشان اضافه شد و دو دقیقه دیگر جوشش ادامه یافت. هفت سی‌سی هپتان از بالای مبرد به

مخلوط در حال جوش افزوده شد، پس از یک دقیقه اجاق را خاموش کرده تا دمای محتویات بالون به دمای اتاق رسید. سپس مبرد را برداشته و مقداری محلول کلرید سدیم اشباع اضافه شد و بالون را چندین بار بصورت دورانی تکان داده، سپس مقدار بیشتری کلرید سدیم اشباع افزوده شد تا سطح مایع به گردن بالون رسید. حدود یک سی‌سی از لایه بالایی را به لوله آزمایش منتقل کرده و سولفات سدیم بدون آب اضافه شد تا آب باقی‌مانده حذف گردید این محلول حاوی حدود ۱۰۰ میلی‌گرم در میلی لیتر استرهای متیل بوده که مستقیماً به دستگاه گاز کروماتوگرافی (GC) تزریق شده و اسیدهای چرب اندازه‌گیری شدند.

ب) روش آزمون نمونه استری شده با دستگاه گاز کروماتوگرافی: گاز کروماتوگرافی مورد استفاده در این طرح دستگاه Varian cp-3800 بود. ستون بکار گرفته شده از نوع مؤیین یا کاپیلاری ویژه متیل استر اسیدهای چرب بود. گاز حامل نیتروژن و گازهای کمکی هیدروژن و هوا هر یک با خلوص بسیار بالا می‌باشند. سیستم تزریق از نوع اسپلیت-اسپلیتلس، دمای انژکتور ۲۵۰، دمای ستون ۱۷۵، دمای آشکارساز ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد و آشکارساز از نوع Flame Ionization Detector (FID) بود (آزادمرد دمی‌چی و دوتا، ۲۰۰۶).

### ۳-۶-۲۱ فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان

به منظور اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان نیاز به استخراج عصاره آنزیمی از ۰/۳ گرم بافت تر برای هر نمونه بود.

مواد و محلول‌های مورد نیاز برای استخراج عصاره آنزیمی و قرائت به شرح ذیل تهیه شد و تمامی آن‌ها در دمای چهار درجه سانتی‌گراد در یخچال نگهداری شد:

- ۱- نمک فسفات پتاسیم (مونو) ۰/۲ مولار: برای تهیه، ۲۷/۲ گرم  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  (وزن مولکولی ۱۳۶/۰۹) در ۵۰۰ میلی لیتر آب مقطر حل شد و به حجم یک لیتر رسید.
- ۲- نمک فسفات پتاسیم (دی) ۰/۲ مولار: برای تهیه، ۳۴/۸ گرم  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  (وزن مولکولی ۱۷۴/۱۸) در ۵۰۰ میلی لیتر آب مقطر با کمک مگنت و استیرر حل شد و به حجم یک لیتر رسید.
- ۳- بافر استخراج فسفات پتاسیم ۵۰ میلی مولار (۰/۰۵ مولار) با اسیدیته هفت و سدیم متابای سولفیت یک میلی مولار (محلول استخراج): از این محلول در مرحله استخراج آنزیم های آنتی اکسیدان از نمونه های گیاهی استفاده شد. برای تهیه بافر استخراج فسفات پتاسیم ۵۰ میلی مولار، ۱۹/۵ میلی لیتر از محلول نمک فسفات پتاسیم (مونو) و ۳۰/۵ میلی لیتر از محلول نمک فسفات پتاسیم (دی) و ۱۰۰ میلی لیتر آب مقطر مخلوط خواهد شد و اسیدیته محلول با pH متر قرائت شد که بایستی برابر با هفت باشد. سپس برای ۲۰۰ میلی لیتر محلول استخراج آماده شده ۰/۰۳۸ گرم متابای سولفیت سدیم اضافه شد.
- ۴- بافر فسفات پتاسیم ۱۰۰ میلی مولار (۰/۱ مولار) با اسیدیته ۷ (محلول قرائت): از این بافر برای قرائت نمونه ها توسط دستگاه اسپکتروفتومتر استفاده شد. برای تهیه بافر استخراج فسفات پتاسیم ۱۰۰ میلی مولار، ۳۹ میلی لیتر از محلول نمک فسفات پتاسیم (مونو) و ۶۱ میلی لیتر از محلول نمک فسفات پتاسیم (دی) و ۱۰۰ میلی لیتر آب مقطر مخلوط شد و اسیدیته محلول با pH متر قرائت شد که بایستی برابر با ۷ باشد.
- ۵- پلی وینیل پیرولیدین : ۳۰ میلی گرم (۰/۰۳ گرم) برای هر نمونه: مراحل استخراج عصاره آنزیمی برای سنجش آنزیم ها و میزان پروتئین برگ به شرح ذیل انجام شد.  
الف) توزین ۰/۳ گرم بافت تر از هر نمونه در فالكون های ۱۵ میلی لیتری

ب) اضافه کردن ۳۰ میلی گرم پلی وینیل پیرولیدین به هر سه میلی لیتر بافر استخراج (برای ۵۰ نمونه نیاز به ۱۵۰ میلی لیتر بافر فسفات استخراج است که در آن ۰/۵ گرم پلی وینیل پیرولیدین حل گردید).

پ) اضافه کردن سه میلی لیتر بافر به هر نمونه (فالکون)

ت) ورتکس شدید نمونه ها به مدت سه تا چهار دقیقه

ج) سانتریفیوژ نمونه ها به مدت ۳۰ دقیقه با سرعت ۱۳۰۰۰ دور در دقیقه و دمای چهار درجه سانتی گراد

چ) پس از اتمام سانتریفیوژ فاز رویی نمونه ها در داخل چند ویال کوچک (۰/۵ میلی لیتری) ریخته شد (هر ویال ۲۰۰ میکرولیتر). سپس ویال های طبقه بندی شده براساس صفات در فویل آلومینیومی قرار گرفتند و بلافاصله به فریزر ۸۰- درجه سانتی گراد منتقل شدند. از این عصاره ها برای تعیین غلظت پروتئین و آنزیم های آنتی اکسیدان استفاده شد.

تمام مراحل در درون یخ و در تاریکی انجام شد.

فعالیت آنزیم پراکسیداز به روش چانس و مهلی (۱۹۹۵) اندازه گیری شد. در این روش به منظور تهیه مخلوط واکنش، ابتدا محلول ها و مواد شیمیایی زیر آماده سازی شد:

الف) آب مقطر استریل (دو بار تقطیر شده)

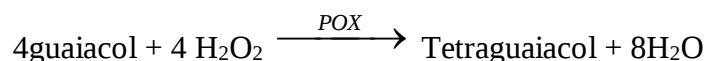
ب) بافر فسفات پتاسیم ۱۰۰ میلی مولار (pH=۷)

ج) گوئیکول ۱۰-۲ میلی مولار محلول در آب دو بار تقطیر (برای این منظور ۵۶ میکرولیتر ۴۹۹۴۴ میکرولیتر آب مقطر حل کردیم تا محلول حاصل بدست آمد).

د) پراکسید هیدروژن ۷۰ میلی‌مولار محلول در فسفات پتاسیم ۱۰۰ میلی‌مولار (برای این منظور ۶۰ میکرولیتر پراکسید هیدروژن ۳۵ درصد، در تاریکی و دمای پائین در ۹۴۴۰ میکرو لیتر بافر فسفات پتاسیم ۱۰۰ میلی‌مولار حل شد).

روش کار: به منظور تهیه مخلوط واکنش در ابتدا ۴۶۶ میکرولیتر از آب مقطر استریل به همراه ۲۵۰ میکرولیتر بافر فسفات پتاسیم ۱۰۰ میلی‌مولار، ۲۵۰ میکرولیتر گوئیکول و ۳۴ میکرولیتر از پراکسید هیدروژن ۷۰ میلی‌مولار (محلول در بافر فسفات پتاسیم) درون یک کووت کوارتز یک میلی‌لیتری ریخته شد و به وسیله آن جهت هضم تدریجی، دستگاه اسپکتوفتومتر در طول موج ۴۷۰ نانومتر صفر شد. سپس ۲۵ میکرولیتر از عصاره آنزیم استخراج شده از برگ به صورت جداگانه به کووت حاوی محلول بالا اضافه شد و در مدت زمان ۱۸۰ ثانیه فعالیت پراکسیداز بر حسب جذب بر دقیقه ترسیم شد.

در این واکنش آنزیم پراکسیداز با استفاده از ترکیبات فنلی گوئیکول به عنوان دهنده الکترون طبق معادله هفت پراکسید هیدروژن را به آب احیا می‌کند.



در اثر این عمل، گوئیکول به تتراگوئیکول تبدیل می‌شود. حداکثر جذب تتراگوئیکول در طول موج ۴۷۰ نانومتر صورت می‌گیرد. از این‌رو با آغاز واکنش بوسیله آنزیم پراکسیداز بتدریج بر میزان تتراگوئیکول در مخلوط واکنش افزوده می‌شود و در نتیجه میزان جذب در طول موج ۴۷۰ نانومتر نیز افزایش می‌یابد.

فعالیت آنزیم پراکسیداز با استفاده از معادله زیر محاسبه شد.

رابطه (۳-۶):

$$\text{Activity (U.ml}^{-1}\text{)} = \frac{\Delta A_{470} \times 1 \times V_t \times d_f}{\varepsilon \times I \times t \times V_s}$$

U: واحد آنزیمی

$\Delta A_{470}$ : تفاوت میزان جذب مخلوط واکنش در زمان شروع و پایان واکنش

1: ضریب پراکسید هیدروژن که معادل چهار می باشد.

$V_t$ : حجم مخلوط واکنش (۱۰۰۰ میکرولیتر)

df: فاکتور رقیق کننده (۲۸/۵۷)

t: مدت زمان واکنش (سه دقیقه)

$V_s$ : حجم نمونه (۳۵ میکرولیتر)

$\varepsilon$ : ضریب خاموشی برابر ۲۶/۶ (m/Mcm)

I: طول مسیر عبور نور از مخلوط واکنش که برابر با یک بود.

فعالیت ویژه آنزیم پراکسیداز به صورت تعداد میکرومول  $H_2O_2$  تجزیه شده در دقیقه در میلی گرم پروتئین گزارش شد.

فعالیت آنزیم کاتالاز به روش آبی (۱۹۸۴) اندازه گیری شد. در این روش به منظور تهیه مخلوط واکنش، ابتدا محلول ها و مواد شیمیایی زیر آماده سازی شد:

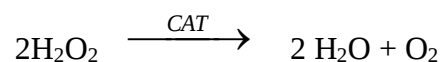
(الف) آب مقطر استریل (دو بار تقطیر شده)

(ب) بافر فسفات پتاسیم ۱۰۰ میلی مولار (pH=۷)

(ج) پراکسید هیدروژن ۷۰ میلی مولار محلول در فسفات پتاسیم ۱۰۰ میلی مولار (برای این منظور ۲۴۰ میکرولیتر پراکسید هیدروژن ۳۵ درصد، در تاریکی و دمای پائین در ۴۰ میلی لیتر بافر فسفات پتاسیم ۱۰۰ میلی مولار حل گردید).

روش کار: به منظور تهیه مخلوط واکنش در ابتدا ۵۰۰ میکرولیتر از آب مقطر استریل به همراه ۲۵۰ میکرولیتر بافر فسفات پتاسیم ۱۰۰ میلی مولار و ۲۵۰ میکرولیتر از پراکسید هیدروژن ۷۰ میلی مولار (محلول در بافر فسفات پتاسیم) درون یک کووت کوارتز یک میلی لیتری ریخته شد و به وسیله آن جهت هضم تدریجی، دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۲۴۰ نانومتر صفر شد. سپس ۲۵ تا ۳۰ میکرولیتر از عصاره آنزیم استخراج شده از برگ به صورت جداگانه به کووت حاوی محلول بالا اضافه شد و در مدت زمان ۱۸۰ ثانیه فعالیت کاتالاز بر حسب جذب بر دقیقه ترسیم شد.

در این واکنش آنزیم کاتالاز بدون نیاز به عامل احیاء کننده طبق معادله نه،  $H_2O_2$  را به  $O_2$  و  $H_2O$  تبدیل می کند.



حداکثر جذب پراکسید هیدروژن در طول موج ۲۴۰ نانومتر صورت می گیرد، از این رو با آغاز واکنش بوسیله آنزیم کاتالاز به تدریج از میزان پراکسید هیدروژن در مخلوط واکنش کم و در نتیجه میزان جذب در طول موج ۲۴۰ نانومتر نیز کاهش می یابد (برگمیر، ۱۹۵۵).

فعالیت آنزیم کاتالاز با استفاده از معادله ده و با اعمال تغییرات زیر محاسبه شد.

رابطه (۷-۳):

$$\text{Activity (U.ml}^{-1}\text{)} = \frac{\Delta A_{240} \times 1 \times V_t \times d_f}{\varepsilon \times I \times t \times V_s}$$

U: واحد آنزیمی

$\Delta A_{470}$ : تفاوت میزان جذب مخلوط واکنش در زمان شروع و پایان واکنش

1: ضریب پراکسید هیدروژن که معادل دو می باشد.

$V_t$ : حجم مخلوط واکنش (۱۰۰۰ میکرولیتر)

$d_f$ : فاکتور رقیق کننده (۲۸/۵۷)

$t$ : مدت زمان واکنش (سه دقیقه)

Vs: حجم نمونه (۳۵ میکرولیتر)

ε: ضریب خاموشی برابر با ۳۹/۴ m/Mcm)

I: طول مسیر عبور نور از مخلوط واکنش که برابر با یک بود.

فعالیت ویژه آنزیم کاتالاز به صورت تعداد میکرومول  $H_2O_2$  تجزیه شده در دقیقه در میلی گرم

پروتئین گزارش شد.

برای سنجش فعالیت سوپراکسید دیسموتاز نیز در طول موج ۵۶۰ نانومتر با استفاده از دستگاه

اسپکتروفوتومتر قرائت شد (بیوچمپ و فدوویچ، ۱۹۷۶).

### ۳-۶-۲۲ تجزیه و تحلیل آماری

در این تحقیق، تجزیه واریانس مرکب داده‌ها بر اساس مدل طرح آماری آزمایش فاکتوریل اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار و به مدت دو سال صورت گرفت. در پایان پس از اطمینان از مفروضات آزمایشی و بعد از انجام آزمون بارتلت و اثبات همگن بودن واریانس‌های آزمایشی نسبت به مقایسه نتایج دو سال آزمایش اقدام شد. از آنجا که به جز صفات دمای کانوپی، میزان کربوهیدرات محلول برگ و اروسیک اسید تفاوتی در یکنواختی واریانس نتایج داده‌های دو سال وجود نداشت تجزیه واریانس در سایر صفات به صورت تجزیه مرکب و در صفات یاد شده به صورت یکساله انجام شد. همچنین همبستگی ساده بین صفات مورد نظر تعیین گردید. داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS (ورژن ۹/۴) تجزیه واریانس مرکب شدند. برای مقایسه میانگین اثرات متقابل از رویه برش‌دهی و برای رسم نمودارها و جداول از نرم‌افزار Excel استفاده شد.

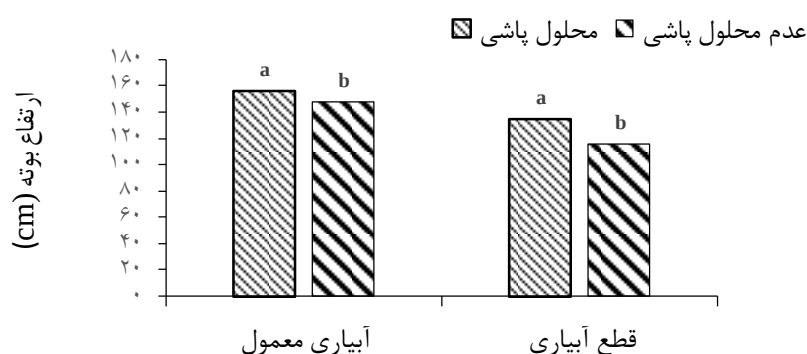
## فصل چهارم: نتایج و بحث

## ۴-۱ صفات مورفولوژیک

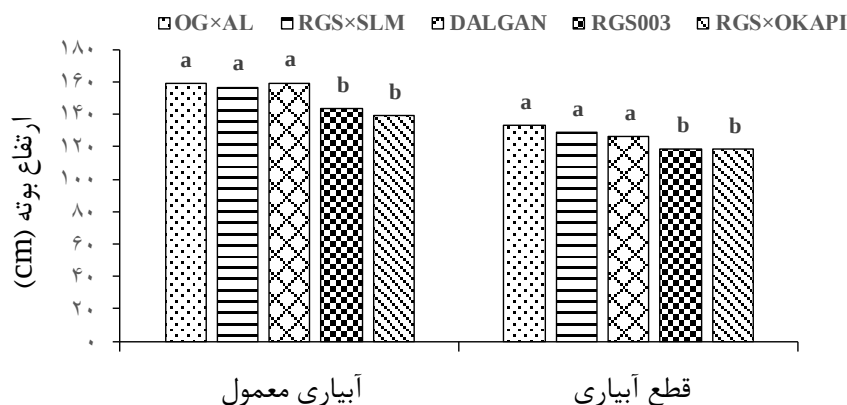
### ۴-۱-۱ ارتفاع بوته

نتایج تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که اثر ساده سال، آبیاری، سیلیکات‌پتاسیم، ژنوتیپ و همچنین اثر متقابل آبیاری×سیلیکات‌پتاسیم در سطح یک درصد و اثر متقابل آبیاری×ژنوتیپ در سطح پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۴-۱). نتایج نشان داد که میانگین ارتفاع بوته در سال اول ۱۳۱/۹ سانتی‌متر و در سال دوم ۱۴۴/۸ سانتی‌متر بود که معادل نه درصد نسبت به سال اول افزایش داشت (جدول ۴-۲). در اغلب گیاهان این صفت با تغییر شرایط محیطی تغییر می‌کند، به نظر می‌رسد بارندگی بالاتر در سال دوم آزمایش باعث افزایش ارتفاع بوته شده است. برهمکنش آبیاری×سیلیکات‌پتاسیم بر صفت ارتفاع بوته در کلزا نشان داد که در آبیاری معمول، محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم با میانگین ۱۵۵/۶۲ سانتی‌متر ارتفاع بوته عملکرد بهتری نسبت به دیگر تیمارها داشت، به‌طوری‌که کمترین ارتفاع بوته (۱۱۵/۹ سانتی‌متر) در تیمار قطع آبیاری و عدم محلول‌پاشی مشاهده شد (شکل ۴-۱). در قطع آبیاری تحت تأثیر محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم ارتفاع بوته ۱۳۴/۴۷ سانتی‌متر شد که نسبت به شرایط عدم محلول‌پاشی ۱۴ درصد افزایش داشت (شکل ۴-۱). در شرایط آبیاری معمول، محلول‌پاشی باعث بهبود ارتفاع بوته نسبت به شاهد گردید. در شرایط قطع آبیاری نیز با توجه به افزایش مقاومت روزه‌ای، کاهش فتوسنتز و همچنین اختلال در فرایندهای سلولی، محلول‌پاشی تفاوت معنی‌داری در بهبود صفت ارتفاع بوته ایجاد کرد. سیلیکات‌پتاسیم از طریق بهبود توانایی برگ در جذب نور، ظرفیت فتوسنتزی و افزایش میزان کلروفیل در برگ اثرات منفی تنش خشکی را کاهش داده و سبب افزایش رشد و در نهایت ارتفاع گیاه می‌گردد (گائو و همکاران، ۲۰۰۴؛ گونگ و همکاران، ۲۰۰۳). کاربرد ترکیبات سیلیکاتی در طول مراحل مختلف رشد بر صفت ارتفاع بوته موثر واقع شد (امیری و همکاران، ۲۰۱۲؛ کیم و همکاران، ۲۰۱۲؛ لی و همکاران، ۲۰۱۰).

در بین ژنوتیپ‌های مورد بررسی تفاوت معنی‌داری از نظر ارتفاع بوته در سطوح آبیاری وجود داشت، به‌طوری‌که در شرایط آبیاری معمول، ژنوتیپ‌های DALGAN و OG×AL و RGS×SLM به‌ترتیب با میانگین ۱۵۹/۱۵، ۱۵۸/۷۵ و ۱۵۶/۹۵ سانتی‌متر و در شرایط قطع آبیاری، ژنوتیپ‌های OG×AL، RGS×SLM و DALGAN به‌ترتیب با میانگین ۱۳۳/۱۶، ۱۲۸/۷۵ و ۱۲۶/۶۵ سانتی‌متر بیشترین ارتفاع را به خود اختصاص دادند (شکل ۴-۲). با آبیاری معمول ارتفاع بوته افزایش یافت که علت آن را می‌توان علاوه بر پتانسیل ژنتیکی ارقام، به وجود شرایط آبیاری نسبت به قطع آبیاری گیاه نسبت داد. سایر محققین نیز تفاوت بین ارقام و گونه‌های کلزا را در صفت ارتفاع بوته گزارش کردند (اقبال و همکاران، ۲۰۰۸). 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 صورت می‌گیرد و هرچه ارتفاع بوته بلندتر باشد، سطح فتوسنتزی و تولید مواد متابولیکی بیشتر خواهد بود (نورتون و همکاران، ۱۹۹۱). شاید بتوان برتری عملکرد این سه ژنوتیپ را با این صفت در ارتباط دانست.



شکل ۴-۱- برهمکنش آبیاری×سیلیکات پتاسیم بر صفت ارتفاع بوته به روش برش‌دهی. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.



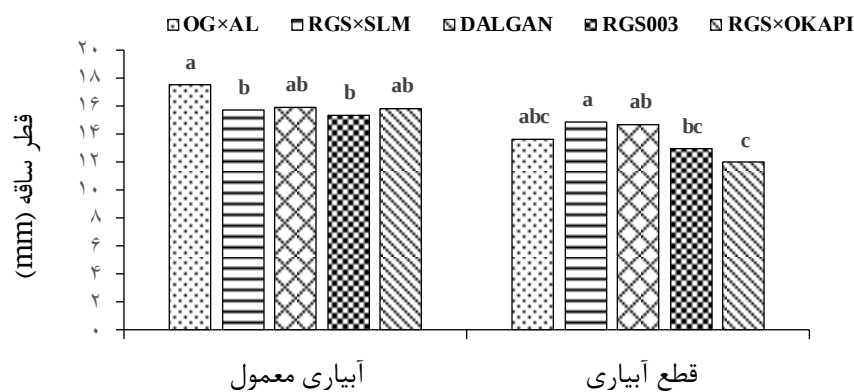
شکل ۲-۴- برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ بر صفت ارتفاع بوته به روش برش دهی. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی دار ندارند.

#### ۲-۱-۴ قطر ساقه

بررسی اثر تیمارهای مورد بررسی بر صفت قطر ساقه نشان داد که تیمارهای سال، آبیاری، ژنوتیپ و برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ در سطح یک درصد معنی دار بود (جدول ۱-۴). نتایج نشان داد که میانگین قطر ساقه در سال اول ۱۳/۱۹ میلی‌متر و در سال دوم ۱۶/۴۹ میلی‌متر بود، که معادل ۲۰ درصد نسبت به سال اول افزایش داشت (جدول ۲-۴). در بین ژنوتیپ‌های مورد بررسی تفاوت معنی داری از نظر قطر ساقه در سطوح آبیاری وجود داشت، به طوری که در شرایط آبیاری معمول، ژنوتیپ OG×AL با میانگین ۱۷/۲۵ میلی‌متر و در شرایط قطع آبیاری، ژنوتیپ RGS×SLM با میانگین ۱۴/۸۵ میلی‌متر بیشترین قطر ساقه را به خود اختصاص دادند. کمترین قطر ساقه نیز به ژنوتیپ RGS×OKAPI (۱۱/۹۷ میلی‌متر) در شرایط قطع آبیاری تعلق داشت (شکل ۳-۴). قطع آبیاری در تمامی ژنوتیپ‌های مورد بررسی سبب کاهش قطر ساقه گردید. کاهش آب مصرفی با کاهش آب سلولی و رشد عرضی و طولی ساقه و همچنین عدم جذب مواد فتوسنتزی موجب کاهش قطر ساقه کلزا گردید.

محققین گزارش نمودند تنش خشکی در کلزا منجر به کاهش قطر ساقه شده است (سنگ‌تراش و همکاران، ۲۰۰۹). بررسی اثر تنش خشکی روی صفت قطر ساقه نشان داد که منابع

ذخیره و تولید مواد فتوسنتزی در اثر اعمال تنش کاهش می‌یابد. تنش خشکی از طریق کاهش سرعت رشد در گره‌ها، کاهش گسترش سطح برگ و ماندگاری آن باعث کاهش ارتفاع بوته می‌گردد. با توجه به هم زمانی رشد طولی ساقه با رشد شاخه‌های جانبی و توسعه خورجین‌ها بروز تنش خشکی در مرحله آخر فصل نه تنها مواد ذخیره‌ای ساقه را کاهش داده، بلکه از توسعه اندام‌های ذخیره‌ای و شاخه‌های جانبی که تولید کننده خورجین‌ها می‌باشد، جلوگیری کرده و بطور غیرمستقیم از طریق کاهش مواد فتوسنتزی و کاهش جایگاه توسعه خورجین‌ها که همان شاخه‌های فرعی می‌باشند منجر به کاهش عملکرد گیاه می‌شود (سید احمدی و همکاران، ۱۳۹۴).



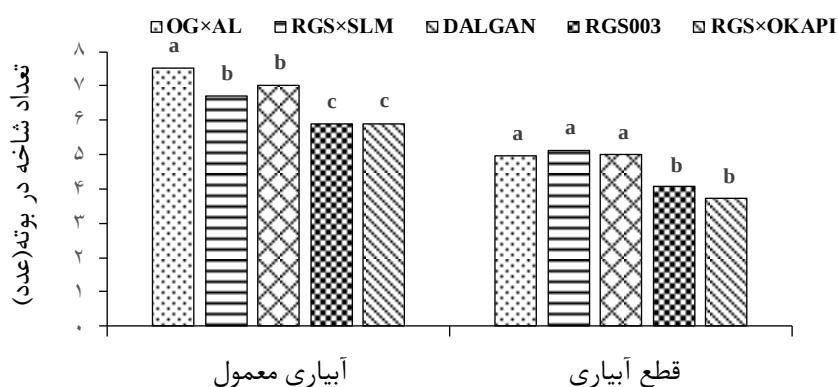
شکل ۴-۳- برهمکنش سطوح آبیاری×ژنوتیپ بر صفت قطر ساقه به روش برش دهی. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

#### ۴-۱-۳ تعداد شاخه در بوته

نتایج تجربه واریانس صفات مورد بررسی نشان داد که اختلاف معنی‌داری در اثرات ساده آبیاری، سیلیکات پتاسیم و ژنوتیپ و همچنین اثر متقابل برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ در سطح احتمال یک درصد وجود دارد (جدول ۴-۱). در بین ژنوتیپ‌های مورد بررسی تفاوت معنی‌داری از نظر تعداد شاخه در بوته در سطوح آبیاری وجود داشت، به‌طوری‌که در آبیاری معمول، ژنوتیپ OG×AL با میانگین ۷/۵ بیشترین تعداد شاخه در بوته و ژنوتیپ‌های RGS003 و RGS×OKAPI به ترتیب با میانگین

۵/۸ و ۵/۹ کمترین تعداد شاخه در بوته را کسب کردند. در قطع آبیاری ژنوتیپ‌های OG×AL، RGS×SLM و DALGAN به ترتیب با میانگین ۴/۹، ۵/۱ و ۵ بیشترین تعداد شاخه در بوته را به خود اختصاص دادند (شکل ۴-۴).

در تمامی ژنوتیپ‌های مورد بررسی قطع آبیاری منجر به کاهش تعداد شاخه در بوته گردید. در گیاهان رشد نامحدود مانند کلزا، به علت رقابت بین اندام‌ها در جذب مواد فتوسنتزی، تنش خشکی در مراحل گلدهی و توسعه خورجین‌ها بر تخصیص مواد فتوسنتزی بین اندام‌های زایشی و رویشی اثر می‌گذارد (سیناکی و همکاران، ۲۰۰۷).



شکل ۴-۴- برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ بر صفت تعداد شاخه در بوته به روش برش‌دهی. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

بررسی اثر ساده محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم نشان داد که از لحاظ صفت تعداد شاخه در بوته در دو گروه آماری متفاوت واقع شدند. به طوری که کاربرد محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم (۵/۸۴) توانست تعداد شاخه در بوته را نسبت به عدم کاربرد (۵/۳۳) آن ۹/۵ درصد افزایش دهد (شکل ۴-۵). در مطالعه‌ای مشاهده شد که کلیه پارامترهای رشد مانند: ارتفاع بوته، تعداد شاخه، تعداد برگ، تعداد گره‌ها، قطر ساقه و وزن خشک گیاه در حضور ترکیبات سیلیکاتی در گندم سیاه افزایش یافت (آزاد و همکاران، ۲۰۲۰).

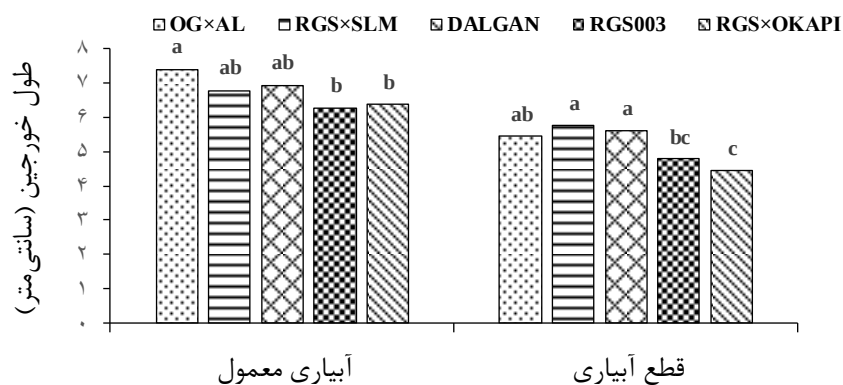


شکل ۴-۵- مقایسه میانگین اثر سیلیکات پتاسیم بر صفت تعداد شاخه در بوته به روش برش دهی. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند

## ۴-۱-۴ طول خورجین

نتایج تجزیه واریانس صفات مورد بررسی نشان داد که اختلاف معنی‌داری در اثرات ساده در سطح یک درصد و همچنین اثر متقابل برهمکنش آبیاری × ژنوتیپ و برهمکنش آبیاری × سیلیکات پتاسیم × ژنوتیپ در سطح احتمال پنج درصد وجود داشت (جدول ۴-۱). نتایج نشان داد که میانگین طول خورجین در سال اول ۵/۳۲ سانتی‌متر و در سال دوم ۶/۶۵ سانتی‌متر بود، که میانگین طول خورجین در سال دوم نسبت به سال اول ۲۰ درصد افزایش داشت (جدول ۴-۲). تنش خشکی باعث کاهش طول خورجین در تمامی ژنوتیپ‌های مورد بررسی شد، به‌طوری‌که در آبیاری معمول، ژنوتیپ OG × AL (۷/۴۱ سانتی‌متر) بیشترین و ژنوتیپ‌های RGS003 و RGS × OKAPI (۶/۲۸ و ۶/۳۸ سانتی‌متر) کمترین طول خورجین را داشتند. در قطع آبیاری نیز ژنوتیپ‌های RGS × SLM و DALGAN (۵/۷۵ و ۵/۶۲ سانتی‌متر) بیشترین و ژنوتیپ RGS × OKAPI (۴/۴۴ سانتی‌متر) کمترین طول خورجین را داشتند. تنش خشکی موجب کاهش ۳۶، ۱۸، ۲۳، ۳۱ و ۴۳ درصدی طول خورجین به ترتیب در ژنوتیپ‌های OG × AL، RGS × SLM، DALGAN، RGS003 و RGS × OKAPI گردید (شکل ۴-۶). اختلاف معنی‌داری در واکنش ژنوتیپ‌ها به تیمارهای آبیاری از نظر کاربرد و عدم کاربرد سیلیکات پتاسیم مشاهده شد، به‌طوری‌که طول خورجین در آبیاری معمول و عدم محلول‌پاشی در ژنوتیپ‌های OG × AL، DALGAN، RGS × SLM، RGS × OKAPI و RGS003 به ترتیب با میانگین‌های ۷/۰۳،

۶/۹۲، ۶/۷۵، ۶/۱۱ و ۵/۹۹ سانتی متر و در شرایط کاربرد محلول پاشی ژنوتیپ‌های OG×AL، DALGAN، RGS×SLM، RGS×OKAPI و RGS003 به ترتیب با میانگین‌های ۷/۸۰، ۶/۹۷، ۶/۸۴، ۶/۶۵ و ۶/۵۷ سانتی متر بود که همگی در یک گروه آماری واقع شدند. در قطع آبیاری و در شرایط عدم محلول پاشی، ژنوتیپ OG×AL (۵/۴۰ سانتی متر) بیشترین و ژنوتیپ RGS×OKAPI (۴/۴۵ سانتی متر) کمترین طول خورجین را داشتند. در قطع آبیاری و محلول پاشی نیز دو ژنوتیپ RGS×SLM و DALGAN با میانگین‌های ۶/۲۳ و ۶/۱۱ سانتی متر بیشترین و ژنوتیپ RGS×OKAPI (۴/۴۳ سانتی متر) کمترین طول خورجین را به خود اختصاص دادند (جدول ۳-۴).



شکل ۴-۶- برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ بر صفت طول خورجین به روش برش‌دهی. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

کاهش طول خورجین به دلیل کاهش منابع ذخیره‌ای و تولید مواد فتوسنتزی در گیاه تحت تنش رخ می‌دهد که از طریق کاهش رشد گره‌ها، منجر به کاهش طول خورجین می‌گردد. خورجین یک سطح فتوسنتزی فعال بوده که در تثبیت مجدد کربن حاصل از تنفس خود و انتقال آن به دانه در حال رشد نقش دارد (ما و همکاران، ۲۰۱۱a). اعمال تنش خشکی منجر به کاهش فتوسنتز و انتقال مواد فتوسنتزی به خورجین‌ها شده، که طول آن‌ها را تحت تأثیر قرار داده و نهایتاً عملکرد دانه کاهش می‌یابد (سید احمدی و همکاران، ۱۳۹۴). در این بین محلول پاشی سیلیکات پتاسیم توانست از اثرات منفی ناشی از تنش خشکی را کاهش دهد و سبب افزایش طول خورجین گردید. احمد و همکاران

(۲۰۱۶) بهبود عملکرد دانه و طول سنبله گندم (*T. aestivum*) را با کاربرد منابع سیلیکون تحت تنش خشکی گزارش کردند.

جدول ۴-۱- نتایج تجزیه مرکب صفات مورفولوژیک کلزا

| منابع تغییرات                          | درجه آزادی | ارتفاع گیاه         | قطر ساقه            | تعداد شاخه در بوته   | طول خورجین          |
|----------------------------------------|------------|---------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| سال                                    | ۱          | ۵۰۰۶/۵**            | ۳۲۸/۴۲**            | ۶/۷۲ <sup>ns</sup>   | ۵۳/۰۲ **            |
| سال (تکرار)                            | ۴          | ۷۳/۴۰               | ۳/۷۷                | ۱/۳۱                 | ۰/۷۴                |
| آبیاری                                 | ۱          | ۲۰۸۱۶/۵۰**          | ۱۸۲/۸۳**            | ۱۲۳/۵۰ **            | ۷۲/۲۸ **            |
| سال × آبیاری                           | ۱          | ۶/۵۸ <sup>ns</sup>  | ۱/۰۸ <sup>ns</sup>  | ۰/۲۱ <sup>ns</sup>   | ۰/۴۵ <sup>ns</sup>  |
| سیلیکات پتاسیم                         | ۱          | ۵۳۶۱/۳۷**           | ۱۲/۲۶ <sup>ns</sup> | ۷/۶۶**               | ۶/۱۳ **             |
| سال × سیلیکات پتاسیم                   | ۱          | ۴۹/۵۴ <sup>ns</sup> | ۰/۰۳ <sup>ns</sup>  | ۰/۰۰۰۶ <sup>ns</sup> | ۰/۳۷ <sup>ns</sup>  |
| آبیاری × سیلیکات پتاسیم                | ۱          | ۸۱۰/۶۸**            | ۰/۰۰۲ <sup>ns</sup> | ۰/۱۳ <sup>ns</sup>   | ۰/۰۶۷ <sup>ns</sup> |
| سال × آبیاری × سیلیکات پتاسیم          | ۱          | ۱۳/۲۷ <sup>ns</sup> | ۰/۶۹ <sup>ns</sup>  | ۰/۰۶ <sup>ns</sup>   | ۰/۰۸ <sup>ns</sup>  |
| خطای (الف)                             | ۱۲         | ۵۸/۸۵               | ۳/۲۴                | ۰/۴۴                 | ۰/۶۰                |
| ژنوتیپ                                 | ۴          | ۱۴۳۲/۷۰**           | ۱۴/۱۸**             | ۱۰/۱۰ **             | ۵/۴۲ **             |
| سال × ژنوتیپ                           | ۴          | ۰/۱۹۶ <sup>ns</sup> | ۰/۰۹ <sup>ns</sup>  | ۰/۰۲ <sup>ns</sup>   | ۰/۰۵۵ <sup>ns</sup> |
| آبیاری × ژنوتیپ                        | ۴          | ۱۱۳/۹۲ *            | ۱۱/۸۸**             | ۰/۸۲ **              | ۰/۹۵ *              |
| سال × آبیاری × ژنوتیپ                  | ۴          | ۳/۴۸ <sup>ns</sup>  | ۱/۳۹ <sup>ns</sup>  | ۰/۱۸ <sup>ns</sup>   | ۰/۰۰۹ <sup>ns</sup> |
| سیلیکات پتاسیم × ژنوتیپ                | ۴          | ۱۷/۳۵ <sup>ns</sup> | ۰/۰۰۵ <sup>ns</sup> | ۰/۰۱ <sup>ns</sup>   | ۰/۰۷۵ <sup>ns</sup> |
| سال × سیلیکات پتاسیم × ژنوتیپ          | ۴          | ۵/۴۷ <sup>ns</sup>  | ۰/۰۰۳ <sup>ns</sup> | ۰/۰۳ <sup>ns</sup>   | ۰/۰۶۷ <sup>ns</sup> |
| آبیاری × سیلیکات پتاسیم × ژنوتیپ       | ۴          | ۸/۸۰ <sup>ns</sup>  | ۰/۰۰۹ <sup>ns</sup> | ۰/۵۹ <sup>ns</sup>   | ۰/۸۸ *              |
| سال × آبیاری × سیلیکات پتاسیم × ژنوتیپ | ۴          | ۷/۰۲ <sup>ns</sup>  | ۰/۱۳۶ <sup>ns</sup> | ۰/۰۲۶ <sup>ns</sup>  | ۰/۰۶ <sup>ns</sup>  |
| خطای (ب)                               | ۶۴         | ۴۵/۱۲               | ۲/۴۸                | ۰/۳۱                 | ۰/۳۱                |
| ضریب تغییرات (%)                       |            | ۴/۸۵                | ۱۰/۶۱               | ۱۰/۱۰                | ۹/۳۳                |

\*، \*\* و ns به ترتیب معنی داری در سطوح احتمال پنج و یک درصد و عدم معنی دار.  
جدول ۴-۲- مقایسه میانگین اثر سال بر صفات مورفولوژیک در کلزا

| سال     | ارتفاع گیاه<br>(سانتی متر) | قطر ساقه<br>( میلی متر) | طول خورجین<br>(سانتی متر) |
|---------|----------------------------|-------------------------|---------------------------|
| سال اول | ۱۳۱/۹۰ b                   | ۱۳/۱۹ b                 | ۵/۳۲ b                    |
| سال دوم | ۱۴۴/۸۲ a                   | ۱۶/۴۹ a                 | ۶/۶۵ a                    |

میانگین های هر ستون با حروف مشترک فاقد اختلاف معنی داری می باشند

جدول ۴-۳- مقایسه میانگین برهمکنش سه گانه آبیاری×سیلیکات پتاسیم×ژنوتیپ بر طول خورجین در ژنوتیپ‌های کلزا به‌روش برش‌دهی

| آبیاری                                | محلول پاشی سیلیکات پتاسیم | ژنوتیپ      | طول خورجین (سانتی متر) |
|---------------------------------------|---------------------------|-------------|------------------------|
| شاهد                                  | عدم محلول پاشی            | OG × AL     | ۷/۰۳ a                 |
|                                       |                           | RGS × SLM   | ۶/۷۵ a                 |
|                                       |                           | DALGAN      | ۶/۹۲ a                 |
|                                       |                           | RGS 003     | ۵/۹۹ a                 |
|                                       |                           | RGS × OKAPI | ۶/۱۱ a                 |
|                                       | LSD (0.05)                |             | ۱/۱۴                   |
|                                       | (۴ گرم در لیتر)           | OG × AL     | ۷/۸۰ a                 |
|                                       |                           | RGS × SLM   | ۶/۸۴ a                 |
|                                       |                           | DALGAN      | ۶/۹۷ a                 |
|                                       |                           | RGS 003     | ۶/۵۷ a                 |
|                                       |                           | RGS × OKAPI | ۶/۶۵ a                 |
|                                       | LSD (0.05)                |             | ۱/۲۳                   |
| قطع آبیاری از مرحله خورجین دهی به بعد | عدم محلول پاشی            | OG × AL     | ۵/۴۰ a                 |
|                                       |                           | RGS × SLM   | ۵/۲۶ ab                |
|                                       |                           | DALGAN      | ۵/۱۴ ab                |
|                                       |                           | RGS 003     | ۴/۵۶ ab                |
|                                       |                           | RGS × OKAPI | ۴/۴۵ b                 |
|                                       | LSD (0.05)                |             | ۰/۹۰                   |
|                                       | (۴ گرم در لیتر)           | OG × AL     | ۵/۵۱ ab                |
|                                       |                           | RGS × SLM   | ۶/۲۳ a                 |
|                                       |                           | DALGAN      | ۶/۱۱ a                 |
|                                       |                           | RGS 003     | ۵/۰۲ bc                |
|                                       |                           | RGS × OKAPI | ۴/۴۳ c                 |
|                                       | LSD (0.05)                |             | ۱/۰۷                   |

میانگین‌های هر ستون با حروف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار می‌باشند.

## ۴-۲ صفات فیزیولوژیک

### ۴-۲-۱ محتوای نسبی آب برگ

نتایج تجزیه مرکب داده‌ها نشان داد که اثرات ساده آبیاری، سیلیکات پتاسیم، ژنوتیپ، اثرات متقابل دوگانه و سه گانه بر صفت محتوای نسبی آب برگ در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۴-۴). بررسی برهمکنش آبیاری×سیلیکات پتاسیم نشان داد در هر دو سطح آبیاری، محلول پاشی سیلیکات پتاسیم سبب افزایش درصد محتوای نسبی آب برگ شد. در آبیاری معمول، محلول پاشی

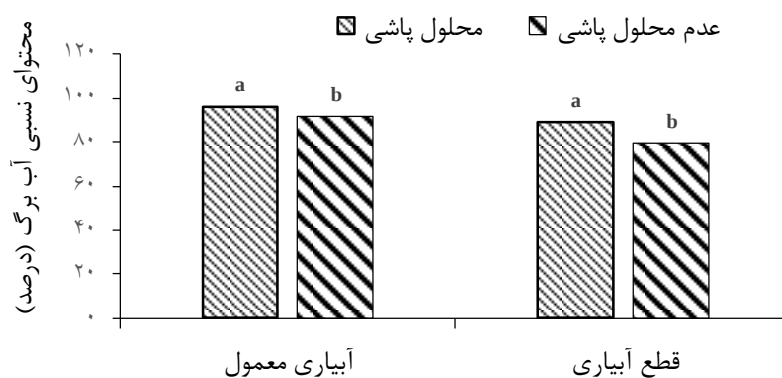
سیلیکات پتاسیم موجب افزایش پنج درصدی و در قطع آبیاری، محلول پاشی سیلیکات پتاسیم موجب افزایش ۱۲ درصدی در این صفت شد (شکل ۴-۷). برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ کلزا نشان داد که قطع آبیاری می‌تواند محتوای نسبی آب برگ ژنوتیپ‌های کلزا را به طور معنی‌داری کاهش داد و میزان کاهش میان ارقام متفاوت بود. در شرایط آبیاری معمول، ژنوتیپ OG×AL با میانگین ۹۵/۶۹ درصد بالاترین و ژنوتیپ RGS003 با میانگین ۹۱/۵۹ درصد کمترین محتوای نسبی آب برگ را برخوردار بودند. در قطع آبیاری، ژنوتیپ‌های OG×AL و RGS×SLM و DALGAN به ترتیب با میانگین ۸۶/۰۲، ۸۷/۰۷ و ۸۷/۴۳ درصد بالاترین و دو ژنوتیپ دیگر کمترین محتوای نسبی آب برگ را داشتند (شکل ۴-۸). بررسی برهمکنش سیلیکات پتاسیم×ژنوتیپ نیز نشان داد که محلول پاشی سیلیکات پتاسیم موجب افزایش محتوای نسبی آب برگ در ژنوتیپ‌های مورد بررسی شد، به‌طوری‌که در عدم محلول پاشی سیلیکات پتاسیم ژنوتیپ‌های OG×AL و DALGAN به ترتیب با میانگین ۸۷/۶۵ و ۸۶/۱۱ درصد بالاترین محتوای نسبی آب برگ را داشتند و در تیمار محلول پاشی سیلیکات پتاسیم نیز ژنوتیپ‌های OG×AL، RGS×SLM و DALGAN به ترتیب با میانگین ۹۴/۰۶، ۹۵/۵۲ و ۹۵/۷۸ درصد بالاترین محتوای نسبی آب برگ را داشتند و از نظر آماری در یک گروه قرار گرفتند. در ژنوتیپ‌های RGS×SLM و DALGAN محلول پاشی سیلیکات پتاسیم توانست محتوای نسبی آب برگ را تا ۱۱ درصد افزایش دهد که بیشترین مقدار افزایش در این دو ژنوتیپ بود (شکل ۴-۹). برهمکنش سه‌گانه آبیاری×سیلیکات پتاسیم×ژنوتیپ نشان داد که در شرایط آبیاری معمول و عدم محلول پاشی سیلیکات پتاسیم ژنوتیپ OG×AL با میانگین ۹۳/۴۷ درصد و در آبیاری کامل و محلول پاشی سیلیکات پتاسیم، ژنوتیپ‌های OG×AL، RGS×SLM و DALGAN به ترتیب با میانگین ۹۷/۹۳، ۹۷/۲۶ و ۹۷/۰۱ درصد بالاترین محتوای نسبی آب برگ را داشتند. در تیمار قطع آبیاری و عدم محلول پاشی سیلیکات پتاسیم، نیز ژنوتیپ OG×AL با میانگین ۸۱/۸۵ درصد و تیمار قطع آبیاری با محلول پاشی سیلیکات پتاسیم، ژنوتیپ‌های RGS×SLM و DALGAN به ترتیب با میانگین ۹۴/۰۳ و ۹۴/۳۰ بیشترین محتوای نسبی آب برگ را داشتند (جدول ۴-۶).

تنش خشکی می‌تواند محتوای نسبی آب برگ ارقام کلزا را به طور معنی‌داری کاهش دهد، هرچند این کاهش میان ارقام متفاوت می‌باشد (قدرتی، ۲۰۱۳؛ مرادی اقدم و همکاران، ۱۳۹۷). بسته شدن روزنه نوعی پاسخ اولیه به تنش خشکی در خاک بوده که با تنظیم روزنه از اتلاف زیاد آب از طریق تعرق جلوگیری می‌گردد. 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 جذب شده، موجب کاهش محتوای نسبی آب برگ می‌شود (حیدری و همکاران، ۱۳۹۳). نتایج مطالعه رشیدی و همکاران (۲۰۱۲) بر روی رابطه بین تحمل به تنش خشکی با تعدادی از صفات فیزیولوژیک در ۲۲ ژنوتیپ کلزا نشان داد که مقدار رطوبت نسبی آب برگ در شرایط تنش آبی کاهش یافت. ژنوتیپی که در شرایط تنش آبی کمترین کاهش را در محتوای نسبی آب برگ داشت، توانایی بیشتری در تنظیم اسمزی تحت تنش داشت (پاسبان اسلام و همکاران، ۲۰۰۰).

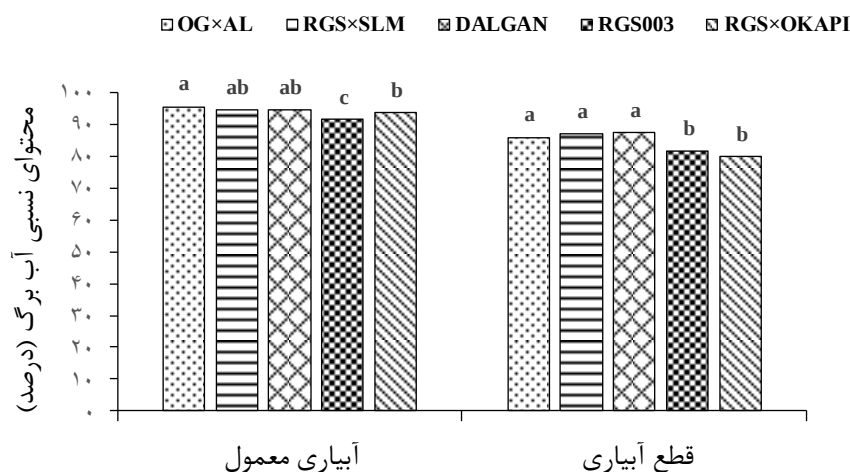
لیانگ و همکاران (۲۰۰۷) به این نتیجه رسیدند که کاربرد ترکیبات سیلیکاتی سبب رسوب آن در غشاء سلولی، سیلیسی، سخت شدن و کاهش معنی‌دار میزان نشت الکترولیتی می‌شود، دلیل این امر را در این می‌دانند که این عنصر در درون گیاه غیر متحرک است و پس از رسوب در داخل سلول به صورت ژل سیلیکا پلیمر شده در می‌آید و دیگر برای گیاه غیر قابل استفاده می‌شود و تنها نقش استحکام و پایداری را خواهد داشت. ما و یاماجی (۲۰۰۶) بیان نمودند که این عنصر با رسوب در زیر لایه کوتیکولی برگ و تشکیل لایه دوکانه کوتیکول-سیلیس به ضخامت ۲/۵ میکرومتر و در نتیجه افزایش ضخامت لایه کوتیکول و موم آن باعث کاهش تعرق از سطح برگ و پوست گیاهی که در شرایط تنش قرار دارد، می‌شود. در نتیجه این عمل محتوای آب گیاه افزایش و توسعه برگی و عملکرد نیز افزایش می‌یابد. احمد و حداد (۲۰۱۱) در آزمایشی بر روی دو ژنوتیپ گندم در شرایط تنش خشکی گزارش دادند که تنش خشکی اعمال شده باعث کاهش معنی‌دار محتوای نسبی آب برگ شده و کاربرد ترکیبات سیلیکاتی در این شرایط، محتوای نسبی آب برگ را در سطح یک درصد افزایش

داد. گیاهان سورگوم (*Sorghum biocolor*) رشد کرده در ظرف‌های حاوی سیلیکون از طریق افزایش جذب آب ساقه، دارای محتوای نسبی آب بیشتری بودند (هاتوری و همکاران، ۲۰۰۵).

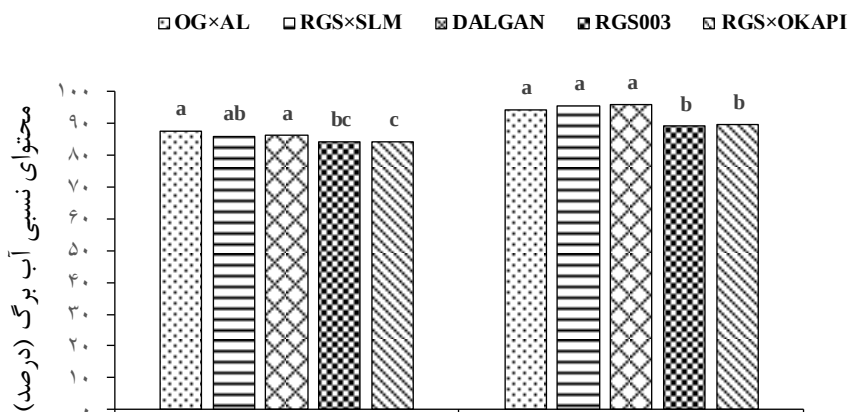
سودمندی ترکیبات سیلیکاتی در تحمل تنش خشکی در غلات مربوط به فعالیت بیشتر در  $H^+-ATPase$  موجود در غشاء و  $H^+-PPase$  در تونوپلاست و جذب بیشتر یون پتاسیم، افزایش غلظت داخل سلول و جذب و نگهداری آب و تأثیر بر فعالیت برخی آنزیم‌ها و فرایندهای فیزیولوژیکی می‌باشد (لیانگ و همکاران، ۲۰۰۳).



شکل ۴-۷- برهمکنش آبیاری × سیلیکات پتاسیم بر صفت محتوای نسبی آب برگ به روش برش‌دهی. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.



شکل ۴-۸- برهمکنش آبیاری × ژنوتیپ بر صفت محتوای نسبی آب برگ به روش برش‌دهی. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

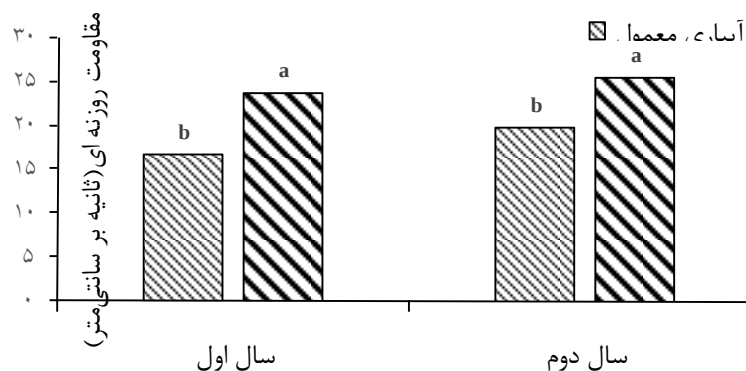


شکل ۹-۴- برهمکنش سیلیکات پتاسیم×ژنوتیپ بر صفت محتوای نسبی آب برگ به روش برش‌دهی. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

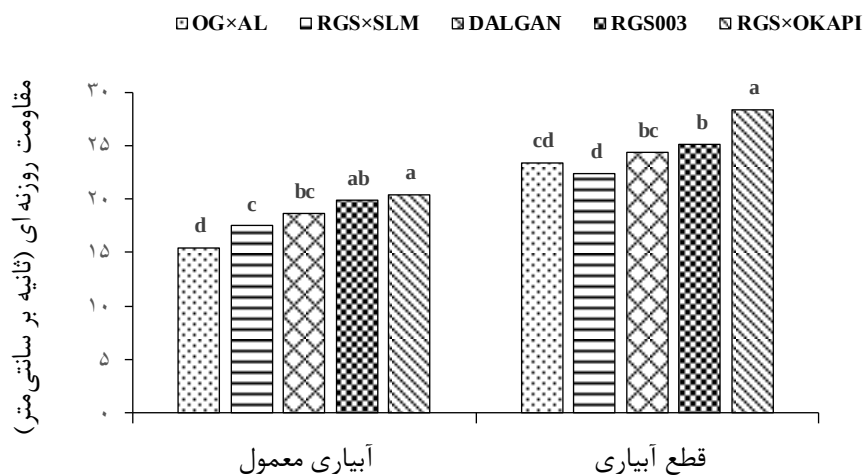
## ۲-۲-۴ مقاومت روزنه‌ای

نتایج تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که اثرات ساده سال، آبیاری، سیلیکات پتاسیم و ژنوتیپ در سطح یک درصد و اثرات متقابل سال×آبیاری و آبیاری×ژنوتیپ نیز بر این صفت معنی‌دار بود (جدول ۴-۴). مقایسه میانگین برهمکنش سال×آبیاری نشان داد میزان مقاومت روزنه‌ای در سال اول و آبیاری معمول با ۱۶/۸ ثانیه بر سانتی متر کمترین و در سال دوم و آقطع بیاری با ۲۵/۵۵ ثانیه بر سانتی متر بیشترین مقاومت روزنه‌ای را داشتند. (شکل ۴-۱۰). تنش خشکی در سال اول و دوم زراعی به ترتیب موجب افزایش ۳۰ و ۲۲ درصدی مقاومت روزنه‌ای برگ‌ها گردید، این مقاومت به دلیل اثرات تنش خشکی بر کاهش میزان نفوذپذیری روزنه‌ها می‌باشد. کاهش میزان مقاومت روزنه‌ای در سال دوم زراعی نیز به دلیل کاهش اثرات تنش خشکی به دلیل افزایش بارندگی و رطوبت قابل دسترس بود (شکل ۴-۱۰). بررسی صفت مقاومت روزنه‌ای در برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ‌های کلزا نشان داد در شرایط آبیاری معمول ژنوتیپ RGS×OKAPI با ۲۰/۴۳ ثانیه بر سانتی‌متر بیشترین و OG×AL با ۱۵/۴۶ ثانیه بر سانتی‌متر کمترین مقاومت روزنه‌ای را داشتند. در قطع آبیاری نیز ژنوتیپ RGS×OKAPI با ۲۸/۳۰ بیشترین و ژنوتیپ RGS×SLM با ۲۲/۳۸ ثانیه بر سانتی‌متر کمترین

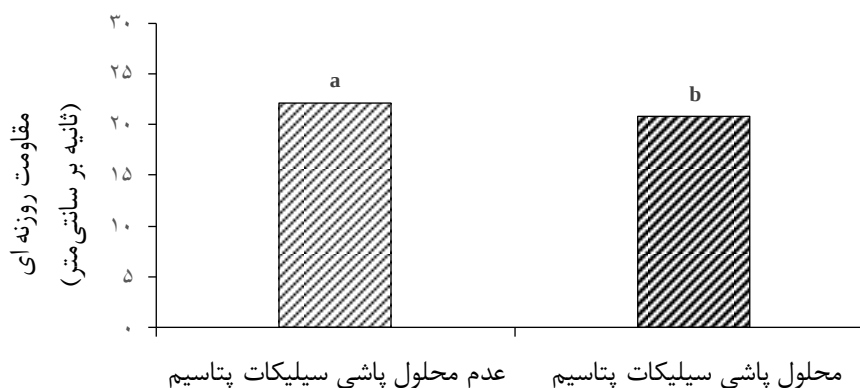
مقاومت روزه‌ای را داشتند (شکل ۴-۱۱). به طور کلی مقاومت روزه‌ای در شرایط قطع آبیاری در کلیه ژنوتیپ‌ها نسبت به شرایط آبیاری کامل بالاتر بود، این افزایش مقاومت روزه‌ای به دلیل بسته‌تر شدن روزه‌ها در شرایط تنش خشکی می‌باشد. محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم موجب کاهش مقاومت روزه‌ای به مقدار ۶/۷ درصد نسبت به شرایط عدم محلول‌پاشی شد (شکل ۴-۱۲).



شکل ۴-۱۰- برهمکنش سال  $\times$  آبیاری بر صفت مقاومت روزه‌ای به روش برش‌دهی. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.



شکل ۴-۱۱- برهمکنش آبیاری  $\times$  ژنوتیپ بر صفت مقاومت روزه‌ای به روش برش‌دهی. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.



شکل ۴-۱۲- مقایسه میانگین اثر سیلیکات پتاسیم بر مقاومت روزنه‌ای به روش برش‌دهی. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند

یکی از راهکارهای تحمل به تنش خشکی بسته شدن روزنه‌های برگ می‌باشد، این عمل رابطه مستقیمی با افزایش مقاومت روزنه‌ای دارد، بنابراین در شرایط آبیاری که گیاه با تنش خشکی همراه نبوده، مقاومت روزنه‌ای کمتری دیده می‌شود، چرا که روزنه‌ها در فرایند فتوسنتز به تبادل‌های گازی خود با محیط ادامه می‌دهند. محلول‌پاشی با نقش مثبت خود در فرایندهای سلولی و افزایش فتوسنتزی گیاه، می‌تواند موجب کاهش میزان مقاومت روزنه‌ای گردد. محققین در مطالعه‌ای نشان دادند که تنش خشکی بر ارقام کلزا باعث افزایش مقاومت روزنه‌ای آن‌ها شد (مرادی اقدم و همکاران، ۱۳۹۷) و با بسته شدن روزنه‌ها و در نتیجه کاهش دسترسی به  $CO_2$  در مزوفیل منجر به کاهش فتوسنتز گیاه گردید (حیدری و همکاران، ۱۳۹۳). تنش خشکی و به دنبال آن افزایش دمای کانوپی از طریق اثر بر مقاومت روزنه‌ای و ورود  $CO_2$  به داخل برگ، موجب کاهش مقدار فتوسنتز می‌شود (مرادی اقدم و همکاران، ۱۳۹۷). بررسی تحمل ارقام کلزا نسبت به تنش خشکی گزارش کردند که تحت تنش خشکی، هدایت روزنه‌ای به طور معنی‌داری کاهش یافت و ژنوتیپ‌هایی با بالاترین توانایی تنظیم اسمزی تحت تنش خشکی، کمترین کاهش را در هدایت روزنه‌ای نشان دادند. به عبارت دیگر ژنوتیپ‌هایی که در برابر خشکی روزنه‌های خود را کمتر بسته نگه‌دارند در برابر شرایط نامساعد محیطی به‌خصوص خشکی متحمل‌تر می‌باشند (پاسبان اسلام و همکاران، ۲۰۰۰). زالی و همکاران

(۱۳۹۵) در بررسی خود نشان دادند تنش خشکی در مرحله گلدهی به طور معنی‌داری مقاومت روزنه‌ای را افزایش داد. همچنین نتایج این بررسی نشان داد میزان هدایت روزنه‌ای در ژنوتیپ‌های کلزا متفاوت می‌باشد. نتایج ارزیابی تحمل به خشکی ۴ رقم کلزا نشان داد تنش خشکی با افزایش مقاومت روزنه‌ای باعث کاهش هدایت روزنه گردید (جمشیدی زیناب و همکاران، ۱۳۹۴).

## ۴-۲-۳ دمای کانوپی

با توجه به آزمون بارتلت صفت دمای کانوپی به صورت جداگانه در دو سال زراعی ۹۵-۹۶ و ۹۶-۹۷ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تجربه واریانس دمای کانوپی نشان داد که در سال اول زراعی اثرات ساده آبیاری و ژنوتیپ و همچنین بر همکنش آبیاری×ژنوتیپ و آبیاری×سیلیکات پتاسیم×ژنوتیپ در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۴-۵). همچنین در سال دوم زراعی نیز اثرات ساده آبیاری، سیلیکات پتاسیم و ژنوتیپ و اثرات متقابل آبیاری×ژنوتیپ و آبیاری×سیلیکات پتاسیم×ژنوتیپ معنی‌دار بود (جدول ۴-۵). نتایج سال اول نشان داد تمامی ژنوتیپ‌ها در آبیاری معمول بدون محلول‌پاشی در یک گروه آماری قرار داشتند. در آبیاری معمول به همراه محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم ژنوتیپ RGS×OKAPI با میانگین ۳۴/۵۵ درجه سانتی‌گراد بیشترین و ژنوتیپ‌های RGS×SLM و DALGAN به ترتیب با میانگین ۳۰/۲۳ و ۳۰/۰۸ درجه سانتی‌گراد کمترین دمای کانوپی را داشتند. در شرایط قطع آبیاری بدون محلول‌پاشی، ژنوتیپ RGS×OKAPI با میانگین ۳۵/۴۹ درجه سانتی‌گراد بیشترین و ژنوتیپ‌های OG×AL و RGS×SLM به ترتیب با میانگین ۳۴/۰۸ و ۳۴/۱۹ کمترین دمای کانوپی را داشتند. در شرایط قطع آبیاری با محلول‌پاشی، ژنوتیپ RGS×SLM و DALGAN به ترتیب با میانگین ۳۵/۹۴ و ۳۶/۱۷ درجه سانتی‌گراد بیشترین و ژنوتیپ‌های OG×AL و RGS×OKAPI به ترتیب با میانگین ۳۱/۲۸ و ۳۱/۷۰ کمترین دمای کانوپی را داشتند (جدول ۴-۷). نتایج سال دوم نیز نشان داد که تمامی ژنوتیپ‌ها در آبیاری معمول بدون محلول‌پاشی در یک گروه آماری قرار داشتند. در آبیاری معمول به همراه محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم ژنوتیپ

RGS×OKAPI با میانگین ۳۳/۶۸ درجه سانتی‌گراد بیشترین و ژنوتیپ‌های RGS×SLM و DALGAN به ترتیب با میانگین‌های ۲۹/۵۸ و ۲۹/۴۳ درجه سانتی‌گراد کمترین دمای کانوپی را داشتند. در قطع آبیاری بدون محلول‌پاشی نیز ژنوتیپ‌های RGS×OKAPI و RGS003 به ترتیب با میانگین ۳۴/۸۴ و ۳۴/۳۰ درجه سانتی‌گراد بیشترین و سه رقم دیگر کمترین میانگین را داشتند و تفاوت آماری معنی‌داری میان آنها نبود. تحت شرایط تنش و تیمار محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم در سال دوم زراعی نیز ژنوتیپ‌های DALGAN، RGS×SLM و RGS003 به ترتیب با میانگین ۳۴/۹۸، ۳۴/۷۵ و ۳۳/۶۵ بیشترین و دو رقم دیگر کمترین میانگین را داشتند (جدول ۴-۷).

به‌طورکلی دمای کانوپی در شرایط قطع آبیاری در ژنوتیپ‌های مورد مطالعه نسبت به شرایط آبیاری معمول بالاتر بود و محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم توانست در برخی ژنوتیپ‌ها باعث افزایش دمای کانوپی تحت شرایط تنش گردد. بررسی‌ها نشان می‌دهد در شرایط قطع آبیاری به دلیل کاهش تعداد شاخه و برگ گیاه، دمای کانوپی می‌تواند افزایش یابد، به طوری که در شرایط آبیاری کامل دمای کانوپی کاهش می‌یابد (اوزر، ۲۰۰۳؛ رشیدی و همکاران، ۲۰۱۲). افزایش درجه حرارت کانوپی به دلیل افزایش تنفس و کاهش تعرق اتفاق می‌افتد. افزایش درجه حرارت کانوپی در مرحله پر شدن دانه اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند، زیرا در زمان پر شدن دانه به دلیل افزایش تشعشع و درجه حرارت و کاهش رطوبت نسبی محیط، کاهش درجه حرارت کانوپی شرایط را برای پر شدن دانه فراهم می‌کند. با کاهش آب، روزنه گیاهان به تدریج بسته‌شده، تعرق کاهش یافته و دمای کانوپی افزایش می‌یابد. تعرق باعث می‌شود که درجه حرارت کانوپی به کمتر از درجه حرارت محیط تنزل پیدا کند، میزان این کاهش با هدایت روزنه‌ای ارتباط دارد که مستقیماً به‌وسیله مکانیزم‌های خود تنظیمی مانند متابولیت‌های فتوسنتزی و انتقال آوندی، تحت اثر قرار می‌گیرد. گیاهان تحت تنش با تنظیم روزنه‌ای مانع از اتلاف شدید آب شده که منجر به افزایش دمای کانوپی می‌گردد (کورنیک، ۲۰۰۰). عنصر سیلیکون از طریق کاهش سرعت تعرق در شرایط تنش، منجر به صرفه جویی در مصرف آب از طریق ممانعت از تخریب آوندها و خروج آب کمتر از گیاه می‌گردد (عزیز و گیل، ۲۰۰۲). کاربرد این عنصر از

طریق اثر بر حرکت روزنه‌ها (گائو و همکاران، ۲۰۰۶) و کاهش قطر منافذ آنها منجر به کاهش تعرق می‌گردد (داتنوف و همکاران، ۲۰۰۱).

جدول ۴-۴- نتایج تجزیه مرکب برخی صفات فیزیولوژیک کلزا

| منابع تغییرات                          | درجه آزادی | محتوای نسبی آب برگ  | مقاومت روزنه ای    |
|----------------------------------------|------------|---------------------|--------------------|
| سال                                    | ۱          | ۰/۱۶ <sup>ns</sup>  | ۱۷۴/۰۲**           |
| سال (تکرار)                            | ۴          | ۸/۱۱۷               | ۵/۰۹               |
| آبیاری                                 | ۱          | ۲۷۴۲/۵۷**           | ۱۲۰۵/۹۳**          |
| سال × آبیاری                           | ۱          | ۰/۳۲ <sup>ns</sup>  | ۱۵/۱۵*             |
| سیلیکات پتاسیم                         | ۱          | ۱۵۳۷/۶۸**           | ۵۸/۶۱**            |
| سال × سیلیکات پتاسیم                   | ۱          | ۰/۱۷ <sup>ns</sup>  | ۰/۱۴ <sup>ns</sup> |
| آبیاری × سیلیکات پتاسیم                | ۱          | ۱۸۳/۶۲ **           | ۰/۰۸ <sup>ns</sup> |
| سال × آبیاری × سیلیکات پتاسیم          | ۱          | ۰/۱۷ <sup>ns</sup>  | ۰/۰۶ <sup>ns</sup> |
| خطای (الف)                             | ۱۲         | ۷/۹۴                | ۲/۳۶               |
| ژنوتیپ                                 | ۴          | ۱۲۵/۶۸ **           | ۹۵/۷۹**            |
| سال × ژنوتیپ                           | ۴          | ۰/۸۹ <sup>ns</sup>  | ۰/۰۵ <sup>ns</sup> |
| آبیاری × ژنوتیپ                        | ۴          | ۴۳/۹۷ **            | ۱۲/۶۵**            |
| سال × آبیاری × ژنوتیپ                  | ۴          | ۰/۷۶ <sup>ns</sup>  | ۱/۰۴ <sup>ns</sup> |
| سیلیکات پتاسیم × ژنوتیپ                | ۴          | ۳۱/۸۳ **            | ۰/۷۹ <sup>ns</sup> |
| سال × سیلیکات پتاسیم × ژنوتیپ          | ۴          | ۰/۱۵ <sup>ns</sup>  | ۰/۰۷ <sup>ns</sup> |
| آبیاری × سیلیکات پتاسیم × ژنوتیپ       | ۴          | ۲۷/۷۷**             | ۲/۸۰ <sup>ns</sup> |
| سال × آبیاری × سیلیکات پتاسیم × ژنوتیپ | ۴          | ۰/۰۴۳ <sup>ns</sup> | ۰/۰۲ <sup>ns</sup> |
| خطای (ب)                               | ۶۴         | ۵/۹۱                | ۱/۳۵               |
| ضریب تغییرات (/.)                      |            | ۲/۷۲                | ۵/۴۱               |

\* ، \*\* و ns به ترتیب معنی‌داری در سطوح احتمال پنج و یک درصد و عدم معنی دار.

جدول ۴-۵- تجزیه واریانس دمای کانوپی تحت تأثیر آبیاری، محلول پاشی و ژنوتیپ کلزا در دو سال زراعی

| میانگین مربعات        |            | منابع تغییرات                    |
|-----------------------|------------|----------------------------------|
| سال اول زراعی (۹۵-۹۶) |            |                                  |
| دمای کانوپی           | درجه آزادی |                                  |
| ۳/۰۴ <sup>ns</sup>    | ۲          | بلوک                             |
| ۶۱/۸۳**               | ۱          | آبیاری                           |
| ۵/۶۲ <sup>ns</sup>    | ۱          | سیلیکات پتاسیم                   |
| ۰/۱۲ <sup>ns</sup>    | ۱          | آبیاری × سیلیکات پتاسیم          |
| ۱/۹۷                  | ۶          | خطای (الف)                       |
| ۳/۸۵**                | ۴          | ژنوتیپ                           |
| ۱۲/۳۱**               | ۴          | آبیاری × ژنوتیپ                  |
| ۰/۸۴ <sup>ns</sup>    | ۴          | سیلیکات پتاسیم × ژنوتیپ          |
| ۱۲/۳۰**               | ۴          | آبیاری × سیلیکات پتاسیم × ژنوتیپ |
| ۰/۶۷                  | ۳۲         | خطای دوم                         |
| ۲/۴۷                  |            | ضریب تغییرات (/.)                |
| سال دوم زراعی (۹۶-۹۷) |            |                                  |
| دمای کانوپی           | درجه آزادی | منابع تغییرات                    |
| ۰/۳۰ <sup>ns</sup>    | ۲          | بلوک                             |
| ۴۵/۹۲**               | ۱          | آبیاری                           |
| ۶/۰۲*                 | ۱          | سیلیکات پتاسیم                   |
| ۰/۵۸ <sup>ns</sup>    | ۱          | آبیاری × سیلیکات پتاسیم          |
| ۰/۴۸                  | ۶          | خطای (الف)                       |
| ۳/۵۵**                | ۴          | ژنوتیپ                           |
| ۹/۸۶**                | ۴          | آبیاری × ژنوتیپ                  |
| ۰/۸۲ <sup>ns</sup>    | ۴          | سیلیکات پتاسیم × ژنوتیپ          |
| ۱۳/۲۵**               | ۴          | آبیاری × سیلیکات پتاسیم × ژنوتیپ |
| ۰/۸۲                  | ۳۲         | خطای دوم                         |
| ۲/۸۰                  |            | ضریب تغییرات (/.)                |

ns و \*\* ، \* به ترتیب معنی داری در سطوح احتمال پنج و یک درصد و عدم معنی دار.

جدول ۴-۶- مقایسه میانگین برهمکنش آبیاری×سیلیکات پتاسیم×ژنوتیپ بر صفات مورد بررسی در ژنوتیپ‌های کلزا به روش برش‌دهی

| آبیاری                                | محلول پاشی سیلیکات پتاسیم | ژنوتیپ      | محتوای نسبی آب برگ (درصد) |
|---------------------------------------|---------------------------|-------------|---------------------------|
|                                       | عدم محلول پاشی            | OG × AL     | ۹۳/۴۷ a                   |
|                                       |                           | RGS × SLM   | ۹۱/۸۶ ab                  |
|                                       |                           | DALGAN      | ۹۱/۶۶ ab                  |
|                                       |                           | RGS 003     | ۹۰/۶۷ b                   |
|                                       |                           | RGS × OKAPI | ۹۰/۴۵ b                   |
| شاهد                                  | LSD (0.05)                |             | ۲/۰۳                      |
|                                       | محلول پاشی                | OG × AL     | ۹۷/۹۳ a                   |
|                                       |                           | RGS × SLM   | ۹۷/۲۶ a                   |
|                                       |                           | DALGAN      | ۹۷/۰۱ a                   |
|                                       |                           | RGS 003     | ۹۲/۵۲ b                   |
|                                       |                           | RGS × OKAPI | ۹۶/۸۱ a                   |
|                                       | LSD (0.05)                |             | ۲/۱۹                      |
|                                       | عدم محلول پاشی            | OG × AL     | ۸۱/۸۵ a                   |
|                                       |                           | RGS × SLM   | ۸۰/۱۲ ab                  |
|                                       |                           | DALGAN      | ۸۰/۵۶ ab                  |
| RGS 003                               |                           | ۷۷/۷۸ b     |                           |
| RGS × OKAPI                           |                           | ۷۷/۶۳ b     |                           |
| قطع آبیاری از مرحله خورجین دهی به بعد | LSD (0.05)                |             | ۳/۴۵                      |
|                                       | محلول پاشی                | OG × AL     | ۹۰/۱۹ b                   |
|                                       |                           | RGS × SLM   | ۹۴/۰۳ a                   |
|                                       |                           | DALGAN      | ۹۴/۳۰ a                   |
|                                       |                           | RGS 003     | ۸۵/۵۲ c                   |
|                                       |                           | RGS × OKAPI | ۸۲/۰۵ d                   |
|                                       | LSD (0.05)                |             | ۳/۰۷                      |

میانگین‌های هر ستون با حروف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار می‌باشند.

جدول ۴-۷- مقایسه میانگین دمای کانوپی کلزا تحت تأثیر آبیاری، سیلیکات پتاسیم و ژنوتیپ در دو سال زراعی

| آبیاری                                         | محلول پاشی<br>سیلیکات پتاسیم | ژنوتیپ      | دمای کانوپی<br>(درجه سانتی گراد)<br>سال اول زراعی (۹۵-۹۶) | دمای کانوپی<br>(درجه سانتی گراد)<br>سال دوم زراعی ۹۶-۹۷ |      |
|------------------------------------------------|------------------------------|-------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|------|
| شاهد                                           | عدم محلول پاشی               | OG × AL     | ۳۱/۹۲ a                                                   | ۳۱/۲۷ a                                                 |      |
|                                                |                              | RGS × SLM   | ۳۲/۲۴ a                                                   | ۳۱/۵۹ a                                                 |      |
|                                                |                              | DALGAN      | ۳۲/۰۳ a                                                   | ۳۱/۴۸ a                                                 |      |
|                                                |                              | RGS 003     | ۳۳/۲۱ a                                                   | ۳۲/۱۳ a                                                 |      |
|                                                |                              | RGS × OKAPI | ۳۳/۳۲ a                                                   | ۳۲/۲۴ a                                                 |      |
|                                                | LSD (0.05)                   |             |                                                           | ۱/۸۰                                                    | ۱/۹۴ |
|                                                | (۴گرم در لیتر)               | OG × AL     | ۳۲/۶۹ ab                                                  | ۳۲/۰۴ b                                                 |      |
|                                                |                              | RGS × SLM   | ۳۰/۲۳ c                                                   | ۲۹/۵۸ c                                                 |      |
|                                                |                              | DALGAN      | ۳۰/۰۸ c                                                   | ۲۹/۴۳ c                                                 |      |
|                                                |                              | RGS 003     | ۳۲/۵۶ b                                                   | ۳۱/۸۰ b                                                 |      |
| RGS × OKAPI                                    |                              | ۳۴/۵۵ a     | ۳۳/۶۸ a                                                   |                                                         |      |
| LSD (0.05)                                     |                              |             | ۱/۸۹                                                      | ۱/۶۲                                                    |      |
| قطع آبیاری<br>از مرحله<br>خورجین<br>دهی به بعد | عدم محلول پاشی               | OG × AL     | ۳۴/۰۸ b                                                   | ۳۳ b                                                    |      |
|                                                |                              | RGS × SLM   | ۳۴/۱۹ b                                                   | ۳۳/۱۱ b                                                 |      |
|                                                |                              | DALGAN      | ۳۴/۴۰ ab                                                  | ۳۳/۲۱ b                                                 |      |
|                                                |                              | RGS 003     | ۳۵/۱۶ ab                                                  | ۳۴/۳۰ a                                                 |      |
|                                                |                              | RGS × OKAPI | ۳۵/۴۹ a                                                   | ۳۴/۸۴ a                                                 |      |
|                                                | LSD (0.05)                   |             |                                                           | ۱/۲۰                                                    | ۱    |
|                                                | (۴گرم در لیتر)               | OG × AL     | ۳۱/۲۸ c                                                   | ۳۰/۲۰ b                                                 |      |
|                                                |                              | RGS × SLM   | ۳۵/۹۴ a                                                   | ۳۴/۷۵ a                                                 |      |
|                                                |                              | DALGAN      | ۳۶/۱۷ a                                                   | ۳۴/۹۸ a                                                 |      |
|                                                |                              | RGS 003     | ۳۴/۷۳ b                                                   | ۳۳/۶۵ a                                                 |      |
| RGS × OKAPI                                    |                              | ۳۱/۷۰ c     | ۳۰/۷۲ b                                                   |                                                         |      |
| LSD (0.05)                                     |                              |             | ۱/۱۵                                                      | ۲/۰۶                                                    |      |

میانگین‌های هر ستون با حروف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار می‌باشند.

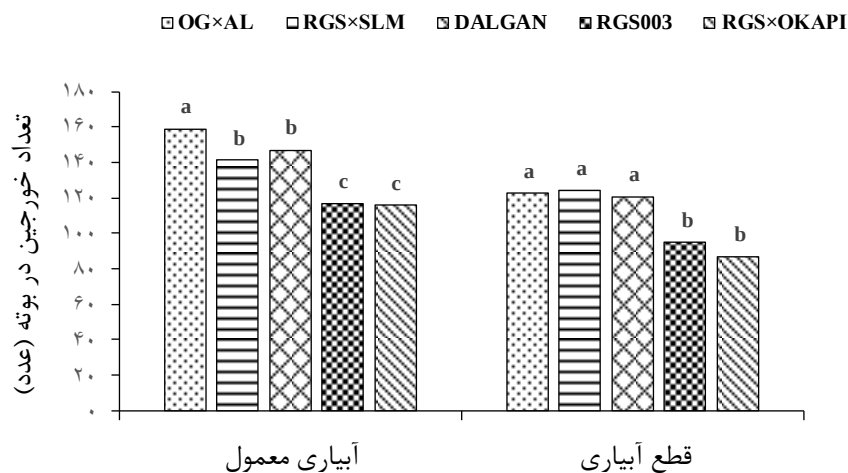
### ۳-۴ صفات مربوط به عملکرد و وابسته به عملکرد

#### ۱-۳-۴ تعداد خورجین در بوته

بررسی اثر تیمارهای مورد بررسی بر صفت تعداد خورجین در بوته نشان داد که اثرات ساده آبیاری، سیلیکات پتاسیم، ژنوتیپ، برهمکنش آبیاری × ژنوتیپ بر این صفت در سطح یک درصد معنی‌دار بود. میانگین تعداد خورجین در بوته در اثرات سه‌گانه برهمکنش آبیاری × سیلیکات پتاسیم × ژنوتیپ در

سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۴-۸). نتایج اثرات متقابل سه گانه نشان داد که در بین ژنوتیپ‌های مورد بررسی تفاوت معنی‌داری از نظر تعداد خورجین در بوته در دو سطح آبیاری در سطوح محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم وجود داشت، به طوری که در آبیاری معمول و عدم محلول‌پاشی، ژنوتیپ‌های  $OG \times AL$ ، DALGAN و  $RGS \times SLM$  به ترتیب با میانگین ۱۴۶/۸، ۱۴۰/۹ و ۱۳۴/۹ عدد و در شرایط کاربرد محلول‌پاشی  $OG \times AL$  با میانگین ۱۷۰/۷ عدد، بیشترین تعداد خورجین در بوته را به خود اختصاص دادند. در قطع آبیاری و عدم محلول‌پاشی، ژنوتیپ‌های  $OG \times AL$ ،  $RGS \times SLM$  و DALGAN به ترتیب با میانگین ۱۱۷/۶، ۱۱۳/۴ و ۱۰۸/۸ عدد و در شرایط محلول‌پاشی  $RGS \times SLM$ ، DALGAN و  $OG \times AL$  به ترتیب با میانگین ۱۳۴/۵، ۱۳۲/۱ و ۱۲۷/۵ عدد بیشترین تعداد خورجین در بوته را داشتند (جدول ۴-۹). محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم در ژنوتیپ‌های  $OG \times AL$ ،  $RGS \times SLM$ ، DALGAN،  $RGS003$  و  $RGS \times OKSPI$  نسبت به شاهد در شرایط آبیاری معمول به ترتیب موجب افزایش ۱۶/۲۸، ۹، ۸/۴۴، ۱۱/۵۹ و ۲۲/۷۸ درصدی تعداد خورجین در بوته گردید، که نشان از کارایی استفاده از سیلیکات پتاسیم در بهبود عملکرد این صفت دارد (جدول ۴-۹). این نسبت در شرایط قطع آبیاری در سیلیکات پتاسیم در ژنوتیپ‌های  $OG \times AL$ ،  $RGS \times SLM$ ، DALGAN،  $RGS003$  و  $RGS \times OKAPI$  نسبت به شاهد به ترتیب موجب افزایش ۸/۴، ۱۸/۵، ۲۱/۴۷، ۱۵/۹۱ و ۸ درصدی تعداد خورجین در بوته گردید (جدول ۴-۹). مقایسه میانگین برهمکنش تیمارهای آبیاری  $\times$  ژنوتیپ کلزا نشان داد که قطع آبیاری موجب کاهش تعداد خورجین در بوته نسبت به شاهد شد. در شرایط آبیاری معمول، ژنوتیپ  $OG \times AL$  با ۱۵۸/۷۵ خورجین در بوته نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها برتری داشت و دو ژنوتیپ  $RGS003$  (۱۱۷/۰۸) و  $RGS \times OKAPI$  (۱۱۵/۸) کمترین تعداد خورجین در بوته را داشتند. در شرایط قطع آبیاری ژنوتیپ‌های  $OG \times AL$ ،  $RGS \times SLM$  و DALGAN بیشترین تعداد خورجین در بوته را داشتند (شکل ۴-۱۳). در شرایط قطع آبیاری کاربرد محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم توانست اثر تنش خشکی را تعدیل و موجب بهبود عملکرد صفت گردد. در شرایط تنش خشکی گیاه با بستن روزنه‌ها سعی در کاهش

اثرات منفی تنش خشکی دارد، این عمل می‌تواند موجب کاهش فعالیت‌های زیستی گیاه همچون فتوسنتز گردد، در این حالت فعالیت‌های آنزیمی و متابولیسمی گیاه دچار اختلال می‌شود. در آزمایش ما تأثیر مثبت محلول پاشی سیلیکات پتاسیم در شرایط تنش خشکی بر صفت تعداد خورجین در بوته، که حساس‌ترین صفت در اجزای عملکرد در این شرایط است (قبادی و همکاران، ۲۰۰۶)، با نتایج تحقیقات دیگران مطابقت داشت (فانی و همکاران، ۲۰۱۹). تنش خشکی با کاهش تعداد خورجین در بوته باعث کاهش عملکرد دانه می‌گردد (شیرانی‌راد و زندی، ۲۰۱۴؛ ما و یاماجی، ۲۰۰۶).

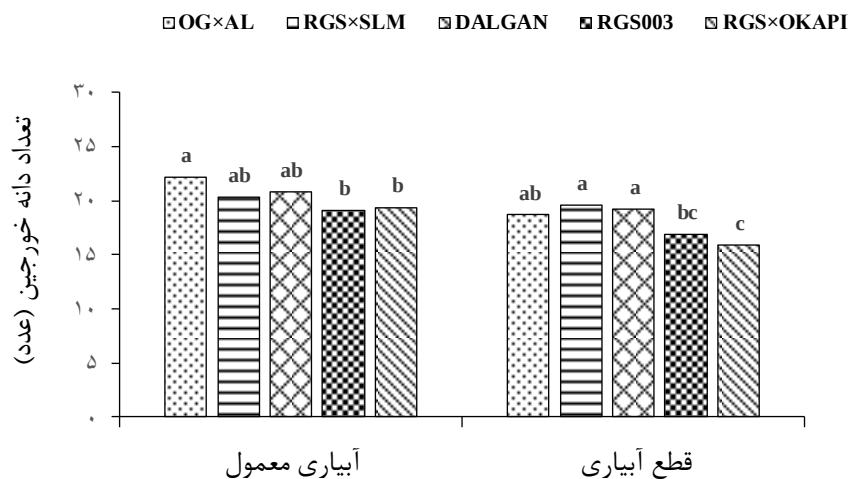


شکل ۴-۱۳- برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ بر صفت تعداد خورجین در بوته به روش برش‌دهی. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

### ۳-۲-۳ تعداد دانه در خورجین

نتایج تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که اثرات ساده سال، آبیاری، سیلیکات پتاسیم، ژنوتیپ، اثرات متقابل برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ و آبیاری×سیلیکات پتاسیم×ژنوتیپ بر تعداد دانه در خورجین در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۴-۸). تعداد دانه در خورجین در سال اول آزمایش ۱۷/۵۸ عدد و در سال دوم ۲۱/۸۱ عدد بود که ۱۸/۳۷ درصد نسبت به سال اول افزایش داشت (جدول ۴-۱۰). بررسی برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ نشان داد در شرایط آبیاری معمول تعداد دانه در خورجین

نسبت به شرایط قطع آبیاری در تمامی ژنوتیپ‌ها بالاتر بود. در آبیاری معمول، ژنوتیپ  $OG \times AL$  با میانگین ۲۲/۱۴ عدد بیشترین و دو ژنوتیپ  $RGS003$  (۱۹/۱۵ عدد) و  $RGS \times OKAPI$  (۱۹/۳۴ عدد) کمترین تعداد دانه در خورجین را داشتند. در قطع آبیاری نیز ژنوتیپ  $RGS \times SLM$  (۱۹/۵۸ عدد) و  $DALGAN$  (۱۹/۲۰ عدد) بیشترین و  $RGS \times OKAPI$  (۱۵/۸۵ عدد) کمترین تعداد دانه در خورجین را داشتند (شکل ۴-۱۴). به‌طور کلی در شرایط آبیاری معمول به دلیل عدم محدودیت ژنوتیپ‌های گیاهی می‌توانند عملکرد بهتری داشته باشند.



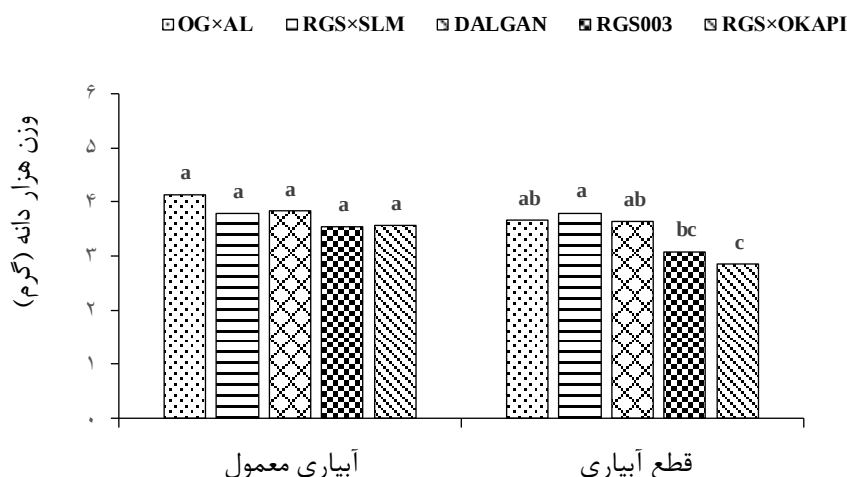
شکل ۴-۱۴- برهمکنش آبیاری  $\times$  ژنوتیپ بر صفت تعداد دانه خورجین به روش برش‌دهی. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

برهمکنش آبیاری  $\times$  سیلیکات پتاسیم  $\times$  ژنوتیپ نیز نشان داد که در بین ژنوتیپ‌های مورد بررسی تفاوت معنی‌داری از نظر تعداد دانه در خورجین در دو سطح آبیاری در سطوح مختلف محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم مشاهده شد، به طوری که در آبیاری معمول در شرایط عدم محلول‌پاشی، ژنوتیپ  $OG \times AL$  با میانگین ۲۰/۹۸ عدد و در شرایط محلول‌پاشی  $OG \times AL$  با میانگین ۲۳/۳۰ عدد، بیشترین تعداد دانه در خورجین را به خود اختصاص داد. در قطع آبیاری از مرحله خورجین‌دهی به بعد در شرایط عدم محلول‌پاشی، ژنوتیپ  $OG \times AL$  با میانگین ۱۸/۵۸ عدد و در شرایط محلول‌پاشی

RGS×SLM با میانگین ۲۰/۹۶ عدد بیشترین تعداد دانه در خورجین را داشتند (جدول ۴-۹). تنش خشکی با افزایش مقاومت روزه‌ای و کاهش فتوسنتز همراه شد، در این شرایط تعداد خورجین و همچنین دانه در هر خورجین کاهش یافت و محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم توانست این صفات را تحت تأثیر مثبت قرار دهد. در شرایط تنش خشکی و کاهش سطح برگ و میزان فتوسنتز، گیاه با محدودیت منبع مواجه می‌شود، این امر می‌تواند در پر شدن دانه و تشکیل دانه نیز مؤثر باشد. کاهش توان مخزن در جذب مواد فتوسنتزی و کاهش تعداد دانه در خورجین به علت تنش خشکی ایجاد می‌شود (فیاض و همکاران، ۱۳۸۶). سیلیکات‌پتاسیم به دلیل رسوب در برگ، به بهبود قدرت مکانیکی ساقه و برگ‌ها در جذب نور و افزایش ظرفیت فتوسنتزی کمک می‌کند. محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم در شرایط تنش موجب افزایش تعداد خورجین در بوته و تعداد دانه در خورجین در کلزا شد، که با نتایج تحقیقات محققان دیگر در گیاهان زراعی در یک راستا بود (بای بوردی، ۲۰۱۶؛ صالح و نجفی، ۲۰۱۱).

#### ۳-۳-۴ وزن هزار دانه

نتایج تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که اثرات ساده و اثر متقابل آبیاری×ژنوتیپ در سطح یک درصد و برهمکنش سه‌گانه آبیاری×سیلیکات‌پتاسیم×ژنوتیپ نیز بر این صفت در سطح پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۴-۸). نتایج نشان داد که میانگین وزن هزار دانه در سال اول ۲/۹۳ گرم و در سال دوم ۴/۲۵ گرم بود، که میانگین وزن هزار دانه در سال دوم نسبت به سال اول ۳۱ درصد افزایش داشت که می‌تواند به دلیل افزایش میزان بارندگی در سال دوم باشد (جدول ۴-۱۰). نتایج برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ کلزا نیز نشان داد در شرایط آبیاری معمول، ژنوتیپ‌ها تفاوت معنی‌داری از لحاظ آماری نداشتند. قطع آبیاری باعث کاهش وزن هزار دانه در ژنوتیپ‌های مورد بررسی شد، به‌طوری‌که ژنوتیپ RGS×SLM با میانگین ۳/۸۰ گرم بیشترین و RGS×OKAPI با میانگین ۲/۸۵ گرم کمترین وزن هزار دانه را داشتند (شکل ۴-۱۵).



شکل ۴-۱۵- برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ بر صفت وزن هزار دانه به روش برش دهی. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

مقایسه میانگین برهمکنش آبیاری×سیلیکات پتاسیم×ژنوتیپ نیز نشان داد که در بین ژنوتیپ‌های مورد بررسی تفاوت معنی‌داری از نظر وزن هزار دانه در دو سطح آبیاری در سطوح محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم مشاهده شد، در آبیاری معمول، با اینکه محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم موجب افزایش وزن هزار دانه نسبت به عدم محلول‌پاشی گردید، ولی تمامی ژنوتیپ‌های مورد مطالعه در یک گروه آماری واقع شدند. قطع آبیاری موجب کاهش وزن هزار دانه در ژنوتیپ‌های مورد بررسی شد. در قطع آبیاری در شرایط عدم محلول‌پاشی، تمامی ژنوتیپ‌ها در یک سطح آماری قرار گرفتند و در شرایط قطع آبیاری و محلول‌پاشی ژنوتیپ‌های RGS×SLM و DALGAN به ترتیب با میانگین ۴/۰۸ و ۳/۸۸ گرم بیشترین وزن هزار دانه را به خود اختصاص دادند (جدول ۴-۹). در شرایط قطع آبیاری نیز محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم در ژنوتیپ‌ها منجر به افزایش وزن هزار دانه گردید. کاربرد سیلیکات پتاسیم باعث افزایش وزن هزار دانه گردیده که این افزایش بیشتر به جایگزینی این عنصر در پوشینه یا گلومل می‌باشد (بالاستا و همکاران، ۱۹۸۹). طی بررسی‌های صورت گرفته بر روی گندم، گزارش شد که تحت تنش خشکی، کاربرد سیلیکات پتاسیم باعث کاهش کمتر وزن سنبله گردید (گونگ و همکاران، ۲۰۰۳). سیلیکات پتاسیم با افزایش شاخص سطح برگ و در نتیجه جذب نور، فتوسنتز را بهبود داده و در دوران رسیدگی منجر به تسریع و تقویت انتقال مواد حاصل از فتوسنتز به

اندام‌های زایشی شده است (لیانگ و همکاران، ۲۰۰۷)، در واقع محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم با جبران کاهش آسیمیلات ناشی از تنش سبب افزایش وزن هزار دانه می‌گردد. کاربرد این عنصر به دلیل بهبود اجزای عملکرد منجر به باعث افزایش عملکرد شد، که در مطالعات زیادی نیز به آن اشاره شده است (آرکادیوس و کوسینسکا، ۲۰۱۶، امین و همکاران، ۲۰۱۶؛ حنفی احمد و همکاران، ۲۰۰۸؛ کالندیک و همکاران، ۲۰۱۴؛ گوگالا و همکاران، ۲۰۱۷؛ وایت و همکاران، ۲۰۱۷).

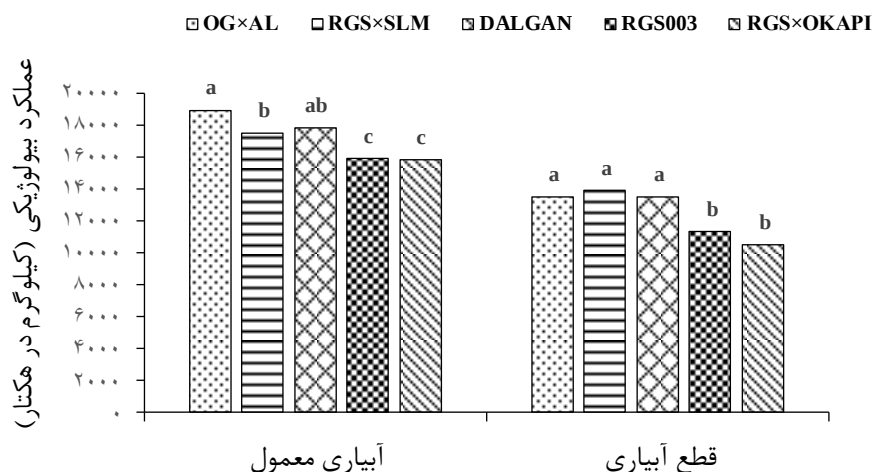
#### ۴-۳-۴ شاخص برداشت

نتایج تجزیه مرکب داده‌ها نشان داد که اثرات ساده، اثرات متقابل دوگانه و سه‌گانه برهمکنش آبیاری×سیلیکات پتاسیم×ژنوتیپ بر شاخص برداشت معنی‌دار نبود (جدول ۴-۸). در گذشته نیز محققین گزارش دادند که زمان‌های مختلف وقوع تنش در گیاه دانه روغنی سویا تأثیری در شاخص برداشت نداشت. این محققین بر این عقیده بودند که فرایندهای رویشی و زایشی گیاه به یک میزان تحت تأثیر تنش رطوبتی قرار می‌گیرند و به همین دلیل، شاخص برداشت در وضعیت‌های مختلف رطوبتی از ثبات زیادی برخوردار است و تغییرات ماده خشک کل گیاه و عملکرد دانه در مقایسه با شاخص برداشت در پاسخ به تنش آب بیشتر است (اسپیت و همکاران، ۱۹۸۴).

#### ۴-۳-۵ عملکرد بیولوژیکی

نتایج تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که اثر ساده سال، آبیاری، سیلیکات پتاسیم و ژنوتیپ در سطح یک درصد و اثر متقابل دوگانه آبیاری×ژنوتیپ و سه‌گانه برهمکنش آبیاری×سیلیکات پتاسیم×ژنوتیپ نیز بر این صفت در سطح پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۴-۸). عملکرد بیولوژیکی کلزا در سال دوم آزمایش نسبت به سال اول خود افزایش قابل‌توجهی داشت، به‌طوری‌که عملکرد بیولوژیکی کلزا ۱۶۱۱۵/۵ کیلوگرم در هکتار در سال دوم بود که نسبت به سال اول ۱۸/۵ درصد افزایش داشت (جدول ۴-۱۰). افزایش بارندگی در سال دوم تحقیق، موجب این افزایش نسبت به سال

اول گردید، که نشان از تأثیر شرایط آب و هوایی بر صفات مورد بررسی تحقیق دارد. به‌طور کلی نتایج این تحقیق نشان داد ژنوتیپ‌های مورد بررسی در شرایط عدم تنش (آبیاری معمول)، نسبت به تنش خشکی اعمال شده، عملکرد بیولوژیک بالاتری داشتند، به طوری که ژنوتیپ  $OG \times AL$  با  $1890/1/3$  کیلوگرم در هکتار در شرایط آبیاری معمول بیشترین عملکرد بیولوژیک و ژنوتیپ‌های  $RGS003$  و  $RGS \times OKAPI$  به ترتیب با میانگین  $15871/9$  و  $15830/5$  کیلوگرم کمترین عملکرد بیولوژیک را داشتند (شکل ۴-۱۶). قطع آبیاری موجب کاهش  $28/57$ ،  $20/49$ ،  $24/17$ ،  $28/55$  و  $33/81$  درصدی عملکرد بیولوژیکی ژنوتیپ‌های  $OG \times AL$ ،  $RGS \times SLM$ ،  $DALGAN$ ،  $RGS003$  و  $RGS \times OKAPI$  گردید که نشان از پاسخ متفاوت ارقام نسبت به تنش خشکی داشت (شکل ۴-۱۶). مقایسه میانگین برهمکنش آبیاری  $\times$  سیلیکات پتاسیم  $\times$  ژنوتیپ نیز نشان داد ژنوتیپ‌های مورد بررسی تفاوت معنی‌داری از نظر عملکرد بیولوژیکی در تیمارهای محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم در دو سطح آبیاری داشتند. در آبیاری معمول بدون محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم، ژنوتیپ‌های  $OG \times AL$  و  $DALGAN$  به ترتیب با عملکرد بیولوژیکی  $18016$  و  $17620$  کیلوگرم در هکتار و در تیمار محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم ژنوتیپ  $OG \times AL$  با عملکرد بیولوژیکی  $19787$  کیلوگرم در هکتار برترین ژنوتیپ‌ها بودند. به علاوه در شرایط قطع آبیاری بعد از خورجین‌دهی در شرایط بدون محلول‌پاشی ژنوتیپ  $OG \times AL$  با عملکرد بیولوژیکی  $13301$  کیلوگرم در هکتار و در تیمار کاربرد محلول سیلیکات پتاسیم ژنوتیپ‌های  $RGS \times SLM$  و  $DALGAN$  به ترتیب با  $14947$  و  $19437$  کیلوگرم در هکتار بالاترین عملکرد بیولوژیکی را داشتند (جدول ۴-۹). اگرچه تنش خشکی موجب کاهش عملکرد بیولوژیک گردید ولی محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم در هر دو سطح آبیاری (معمول و قطع آبیاری) موجب افزایش عملکرد بیولوژیک در ژنوتیپ‌های مورد بررسی شد.



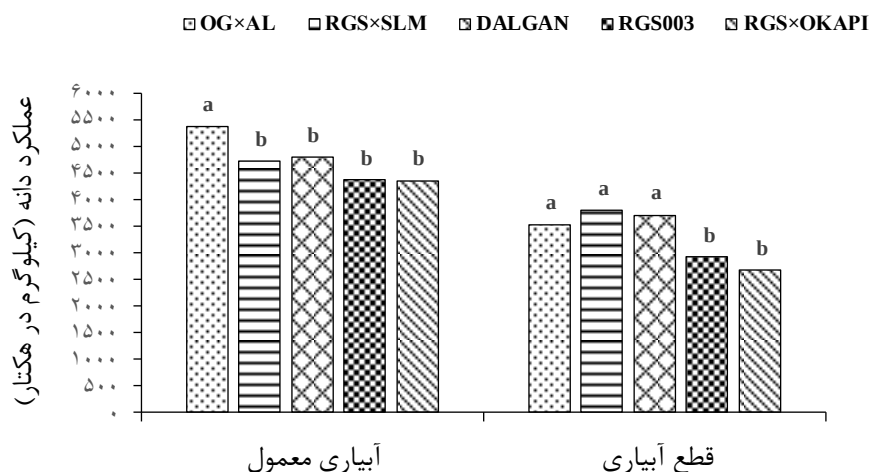
شکل ۴-۱۶- برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ بر عملکرد بیولوژیکی به روش برش‌دهی. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

تنش خشکی، تجمع ماده خشک را به طور منفی تحت تأثیر قرار می‌دهد. تنش خشکی منجر به کاهش سطح برگ و ظرفیت فتوسنتزی گیاه شده و سبب کاهش تولید و تجمع ماده خشک می‌گردد (قاسمی گلعدانی و همکاران، ۲۰۰۹). کوتاه شدن مراحل رویشی و زایشی منجر به کاهش رشد رویشی، درصد پوشش سبز و اجزای عملکرد می‌گردد که در نهایت باعث افت عملکرد بیولوژیکی تحت تنش خشکی می‌گردد (قاسمی گلعدانی و مردفر، ۲۰۰۸). گزارش شده که افزایش تنش خشکی باعث کاهش عملکرد بیولوژیکی می‌شود (ژو و همکاران، ۲۰۱۵) این کاهش بسته به نوع گیاه و در هر رقم متفاوت است. دلیل افزایش تولید ماده خشک در گیاهان تحت تیمار آبیاری معمول، گسترش بیشتر و دوام بهتر سطح برگ است که موجب ایجاد منبع فیزیولوژیکی کافی به منظور استفاده هرچه بیشتر از نور دریافتی و تولید ماده خشک می‌گردد که نتیجه این گزارش با این تحقیق مطابقت دارد. از مراحل حساس در کلزا، مراحل گلدهی و نمو خورجین‌ها می‌باشد که تنش در این مراحل به دلیل تأثیر بر میزان جذب آسمیلات‌ها موجب کاهش عملکرد می‌شود. کاربرد ترکیبات سیلیکاتی منعکس‌کننده افزایش سطح برگ و وزن خشک بود (عبد الگاود و همکاران، ۲۰۱۷؛ کایا و همکاران، ۲۰۰۶). اثر مثبت سیلیکون بر رشد رویشی می‌تواند با فعال کردن سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدانی و یا از طریق محافظت از رنگدانه‌های فتوسنتزی موجود در گیاه تحت تأثیر تنش نسبت داده شود (اشرف

و همکاران، ۲۰۱۰). استفاده از ترکیبات سیلیکاتی (سیلیکات کلسیم) روی دو رقم ذرت باعث افزایش عملکرد بیولوژیکی شد که در نهایت به رشد و عملکرد بهتر کمک کرد (امین و همکاران، ۲۰۱۶).

#### ۴-۳-۶ عملکرد دانه

نتایج تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که اثرات ساده سال، آبیاری، سیلیکات پتاسیم و ژنوتیپ، اثر متقابل آبیاری×ژنوتیپ و اثر سه‌گانه آبیاری×سیلیکات پتاسیم×ژنوتیپ نیز بر این صفت معنی‌دار بود (جدول ۴-۸). عملکرد دانه در سال اول ۳۶۱۷ کیلوگرم در هکتار و در سال دوم ۴۴۰۶/۷ کیلوگرم در هکتار بود (جدول ۴-۱۰). افزایش بارندگی در سال دوم نسبت به سال اول منجر به افزایش ۱۷ درصدی عملکرد دانه گردید. مقایسه میانگین برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ نیز نشان داد، در آبیاری معمول ژنوتیپ OG×AL با عملکرد ۵۳۵۳/۵ کیلوگرم در هکتار بیشترین و ژنوتیپ‌های دیگر کمترین عملکرد دانه را داشتند و در یک گروه آماری قرار گرفتند. قطع آبیاری باعث کاهش عملکرد دانه در ژنوتیپ‌های مورد بررسی گردید، به‌طوری‌که میزان کاهش در ژنوتیپ‌های OG×AL، RGS×SLM، DALGAN، RGS003 و RGS×OKAPI به ترتیب ۳۵/۲۵، ۱۹/۳۸، ۲۲/۵۰، ۳۳/۲۵ و ۳۸/۸۱ درصد بود (شکل ۴-۱۷). مقایسه میانگین برهمکنش آبیاری×سیلیکات پتاسیم×ژنوتیپ نیز نشان داد، بالاترین میزان عملکرد دانه در آبیاری معمول، بدون محلول‌پاشی به ژنوتیپ OG×AL با عملکرد دانه ۵۰۸۷ کیلوگرم در هکتار و در تیمار محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم به ژنوتیپ OG×AL با عملکرد دانه ۵۶۲۰ کیلوگرم در هکتار تعلق داشت که ۹/۴ درصد افزایش داشت. در شرایط قطع آبیاری و بدون محلول‌پاشی، ژنوتیپ‌های OG×AL، RGS×SLM و DALGAN به ترتیب با عملکرد دانه ۳۵۰۶، ۳۴۶۴ و ۳۳۸۸ کیلوگرم در هکتار و در تیمار کاربرد محلول سیلیکات پتاسیم ژنوتیپ‌های RGS×SLM و DALGAN به ترتیب با ۴۱۲۴ و ۴۰۱۷ کیلوگرم در هکتار بالاترین عملکرد دانه را داشتند که به ترتیب ۱۶ و ۱۵/۶۵ درصد افزایش عملکرد نسبت به شرایط قطع آبیاری بدون محلول‌پاشی را احراز کرد (جدول ۴-۹).



شکل ۴-۱۷- برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ بر عملکرد دانه به روش برش‌دهی. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

تنش خشکی با تأثیر مستقیم بر مقدار تولیدات فتوسنتزی از طریق بسته شدن روزنه‌ها و تجزیه آنزیم‌ها و سلول‌ها منجر به کاهش عملکرد دانه می‌گردد (ال‌صباغ و همکاران، ۲۰۱۹؛ اقدام و همکاران، ۲۰۱۹). تنش خشکی کلیه فرآیندهای فیزیولوژیک گیاهان را تحت تأثیر قرار داده، باعث کاهش تقسیم سلولی، سطح برگ و در نهایت باعث کاهش عملکرد گیاه می‌گردد (فایز و همکاران، ۲۰۱۵). بررسی‌ها نشان می‌دهد، قطع آبیاری در کلزا منجر به کاهش ۲۵ درصدی عملکرد دانه نسبت به تیمار شاهد می‌گردد (قدرتی، ۲۰۱۳). حیدری و همکاران (۱۳۹۳) در بررسی خود نشان دادند با کاهش آبیاری در دو ژنوتیپ کلزا، عملکرد دانه ۴۰ درصد کاهش یافت. دیگر محققین اظهار داشتند هنگامی که گیاه در مرحله رشد خورجین‌ها با کمبود آب مواجه گردد، انتقال مواد غذایی به دانه‌ها تقلیل یافته و عملکرد کاهش می‌یابد که متأثر از کاهش اجزای عملکرد از جمله تعداد خورجین، تعداد دانه در خورجین، ارتفاع بوته و وزن زیست توده بوده است (ملازم و همکاران، ۲۰۱۳؛ بامری و همکاران، ۲۰۱۲).

سیلیکون با سرعت بخشیدن به رشد رویشی و افزایش تولید ماده خشک و کاهش تعرق باعث افزایش کیفیت دانه و در نهایت عملکرد می‌گردد (آگاری و همکاران، ۱۹۹۳). همچنین ترکیبات

سیلیکاتی روی گیاهان زراعی منجر به افزایش تحمل به خشکی (گونگ و همکاران، ۲۰۰۸) و عملکرد (اپستاین، ۲۰۰۱؛ الوارز و همکاران، ۱۹۸۸) می‌شود. سیلیکون به انواع محصولات زراعی مانند برنج و نیشکر اضافه شد که منجر به افزایش ماده خشک و عملکرد گردید (کوردورفر و لپش، ۲۰۰۱). نتایج مشابه در پژوهش‌های صورت گرفته حاکی از تأثیر مثبت سیلیکات‌پتاسیم بر رشد و عملکرد دانه در گونه‌های مختلف می‌باشد (آرکادیوس و کوسینسکا، ۲۰۱۶؛ امین و همکاران، ۲۰۱۸؛ کالندیک و همکاران، ۲۰۱۴؛ گوگالا و همکاران، ۲۰۱۷؛ ماو یاماجی، ۲۰۰۸).

جدول ۴-۸- نتایج تجزیه مرکب صفات عملکرد و اجزای عملکرد مورد بررسی کلزا

| منابع تغییرات                          | درجه آزادی | تعداد خورجین در بوته  | تعداد دانه در خورجین | وزن هزار دانه       | شاخص برداشت         | عملکرد بیولوژیکی        | عملکرد دانه             |
|----------------------------------------|------------|-----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|
| سال                                    | ۱          | ۴۹۰۷/۰۱ <sup>ns</sup> | ۳۱۲/۵۰**             | ۵۲/۶۶**             | ۱۷/۶۳ <sup>ns</sup> | ۱۹۱۳۲۷۰۳۱/۴۰**          | ۱۸۷۱۱۷۹۱/۵۸**           |
| سال × تکرار                            | ۴          | ۷۴۳/۳۴                | ۹/۳۷                 | ۰/۳۰                | ۱۴/۱۲               | ۱۳۳۹۰۲۰                 | ۳۲۷۵۰۴/۴۲               |
| آبیاری                                 | ۱          | ۲۰۴۳۴/۲۱**            | ۱۵۸/۵۰**             | ۴/۱۳**              | ۳۰/۲۲ <sup>ns</sup> | ۶۴۳۶۹۹۱۲۸**             | ۵۸۰۷۴۱۸۳/۷۷**           |
| سال × آبیاری                           | ۱          | ۳۱۵/۱۲ <sup>ns</sup>  | ۵/۴۸ <sup>ns</sup>   | ۰/۰۵ <sup>ns</sup>  | ۱/۲۷ <sup>ns</sup>  | ۳۱۰۵۵۳/۲۰ <sup>ns</sup> | ۲۰۵۶۶۴/۴۴ <sup>ns</sup> |
| سیلیکات پتاسیم                         | ۱          | ۸۱۴۶/۳۹**             | ۵۱/۸۹**              | ۲/۰۳**              | ۱/۳۴ <sup>ns</sup>  | ۳۷۱۵۴۳۰۰/۱۰**           | ۳۴۳۲۹۴۳/۲۴**            |
| سال × سیلیکات پتاسیم                   | ۱          | ۱۰/۳۱ <sup>ns</sup>   | ۵/۲۳ <sup>ns</sup>   | ۰/۲۳ <sup>ns</sup>  | ۰/۴۹ <sup>ns</sup>  | ۴۴۶۰۳/۱۰ <sup>ns</sup>  | ۳۳/۶۶ <sup>ns</sup>     |
| آبیاری × سیلیکات پتاسیم                | ۱          | ۶۴/۵۰ <sup>ns</sup>   | ۰/۰۰۰۱ <sup>ns</sup> | ۰/۰۱ <sup>ns</sup>  | ۰/۹۰ <sup>ns</sup>  | ۶۸۸۱/۱۰ <sup>ns</sup>   | ۵۶۸۹/۹ <sup>ns</sup>    |
| سال × آبیاری × سیلیکات پتاسیم          | ۱          | ۶/۷۰ <sup>ns</sup>    | ۰/۰۷ <sup>ns</sup>   | ۰/۰۰۶ <sup>ns</sup> | ۰/۰۷ <sup>ns</sup>  | ۸۴۴/۷ <sup>ns</sup>     | ۰/۲۹ <sup>ns</sup>      |
| خطای (الف)                             | ۱۲         | ۹۸/۸۳                 | ۳/۳۰                 | ۰/۱۲                | ۱۸/۰۰۷              | ۱۲۹۹۳۲۶                 | ۲۱۵۸۱۱/۴۸               |
| ژنوتیپ                                 | ۴          | ۷۶۲۱/۷۴**             | ۳۹/۶۱**              | ۲/۳۱**              | ۴/۷۱ <sup>ns</sup>  | ۴۵۲۰۶۳۷۶/۴۰**           | ۴۱۷۵۳۰۱/۴۴**            |
| سال × ژنوتیپ                           | ۴          | ۲/۵۶ <sup>ns</sup>    | ۰/۲۰ <sup>ns</sup>   | ۰/۱۶ <sup>ns</sup>  | ۱/۱۹ <sup>ns</sup>  | ۳۱۷۹۸۸/۹۰ <sup>ns</sup> | ۹۲۳۶۰۷/۴۶ <sup>ns</sup> |
| آبیاری × ژنوتیپ                        | ۴          | ۳۰۸/۲۲**              | ۸/۵۶**               | ۰/۴۷**              | ۱۲/۵۲ <sup>ns</sup> | ۳۵۱۱۱۶۴/۳۰*             | ۹۲۳۶۰۷/۶۴**             |
| سال × آبیاری × ژنوتیپ                  | ۴          | ۶/۰۳ <sup>ns</sup>    | ۰/۰۵ <sup>ns</sup>   | ۰/۰۶ <sup>ns</sup>  | ۱/۸۵ <sup>ns</sup>  | ۲۳۰۰۵۶/۴۰ <sup>ns</sup> | ۳۷۱۷/۸ <sup>ns</sup>    |
| سیلیکات پتاسیم × ژنوتیپ                | ۴          | ۵/۰۹ <sup>ns</sup>    | ۰/۳۵ <sup>ns</sup>   | ۰/۰۰۹ <sup>ns</sup> | ۰/۴۹ <sup>ns</sup>  | ۴۷۷۹۳/۹۰ <sup>ns</sup>  | ۷۰۳۹/۹۷ <sup>ns</sup>   |
| سال × سیلیکات پتاسیم × ژنوتیپ          | ۴          | ۶/۱۳ <sup>ns</sup>    | ۰/۰۰۷ <sup>ns</sup>  | ۰/۰۰۴ <sup>ns</sup> | ۱/۰۷ <sup>ns</sup>  | ۱۱۴۶۶۵/۴۰ <sup>ns</sup> | ۴۲۴۲/۴۵ <sup>ns</sup>   |
| آبیاری × سیلیکات پتاسیم × ژنوتیپ       | ۴          | ۲۴۹/۰۱*               | ۸/۵۴**               | ۰/۲۹*               | ۱/۰۲ <sup>ns</sup>  | ۳۵۸۹۸۷۲/۷۰*             | ۴۲۵۰۴۵/۵۸*              |
| سال × آبیاری × سیلیکات پتاسیم × ژنوتیپ | ۴          | ۱۶/۵۹ <sup>ns</sup>   | ۰/۰۲۲ <sup>ns</sup>  | ۰/۰۰۲ <sup>ns</sup> | ۰/۳۷ <sup>ns</sup>  | ۳۹۷۲۶/۵۰ <sup>ns</sup>  | ۱۹۲۵/۱ <sup>ns</sup>    |
| خطای (ب)                               | ۶۴         | ۸۷/۶۶                 | ۲/۱۵                 | ۰/۰۹                | ۷/۵۷                | ۱۰۱۰۵۶۳                 | ۱۴۸۳۲۵/۲۰               |
| ضریب تغییرات (/.)                      |            | ۷/۶۱                  | ۷/۶۵                 | ۸/۶۹                | ۱۰/۲۲               | ۶/۷۶                    | ۱۱/۶۸                   |

\*, \*\* و ns به ترتیب معنی‌داری در سطوح احتمال پنج و یک درصد و عدم معنی دار.

جدول ۴-۹- مقایسه میانگین برهمکنش سه گانه آبیاری × سیلیکات پتاسیم × ژنوتیپ بر صفات مورد بررسی در ژنوتیپ‌های کلزا به‌روش برش‌دهی

| آبیاری                                      | محلول پاشی سیلیکات پتاسیم     | ژنوتیپ      | تعداد خورجین در بوته<br>(عدد) | تعداد دانه در<br>خورجین (عدد) | وزن هزار دانه<br>(گرم) | عملکرد بیولوژیکی<br>(کیلوگرم در هکتار) | عملکرد دانه<br>(کیلوگرم در هکتار) |
|---------------------------------------------|-------------------------------|-------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------|
| شاهد                                        | عدم محلول پاشی                | OG × AL     | ۱۴۶/۸۰ a                      | ۲۰/۹۸ a                       | ۳/۹۲ a                 | ۱۸۰۱۶/۱ a                              | ۵۰۸۶/۷ a                          |
|                                             |                               | RGS × SLM   | ۱۳۴/۹۴ a                      | ۲۰/۱۲ ab                      | ۳/۷۶ a                 | ۱۷۲۶۲/۴ ab                             | ۴۶۸۱/۵ ab                         |
|                                             |                               | DALGAN      | ۱۴۰/۹۸ a                      | ۲۰/۶۲ ab                      | ۳/۸۲ a                 | ۱۷۶۲۰/۸ a                              | ۴۷۲۵/۳ ab                         |
|                                             |                               | RGS 003     | ۱۰۸/۱۱ b                      | ۱۸/۵۵ ab                      | ۳/۴۴ a                 | ۱۵۲۶۰/۲ bc                             | ۴۱۷۹/۸ b                          |
|                                             |                               | RGS × OKAPI | ۱۰۳/۹۶ b                      | ۱۸/۱۸ b                       | ۳/۳۴ a                 | ۱۴۹۴۰/۷ c                              | ۴۰۵۳ b                            |
|                                             | LSD (0.05)                    |             | ۱۵/۴۷                         | ۲/۶۸                          | ۰/۹۸                   | ۲۰۵۰/۴                                 | ۷۵۲/۱۳                            |
|                                             | محلول پاشی<br>(۴ گرم در لیتر) | OG × AL     | ۱۷۰/۷۱ a                      | ۲۳/۳۰ a                       | ۴/۳۶ a                 | ۱۹۷۸۷ a                                | ۵۶۲۰/۳ a                          |
|                                             |                               | RGS × SLM   | ۱۴۷/۲۰ b                      | ۲۰/۵۳ ab                      | ۳/۸۲ a                 | ۱۷۶۶۶ ab                               | ۴۷۳۱/۸ b                          |
|                                             |                               | DALGAN      | ۱۵۲/۸۹ b                      | ۲۰/۹۳ ab                      | ۳/۸۸ a                 | ۱۷۹۳۲ ab                               | ۴۸۳۲/۲ b                          |
|                                             |                               | RGS 003     | ۱۲۶/۰۵ c                      | ۱۹/۷۷ b                       | ۳/۶۷ a                 | ۱۶۴۸۴ b                                | ۴۵۲۷ b                            |
|                                             |                               | RGS × OKAPI | ۱۲۷/۶۵ c                      | ۲۰/۵۰ ab                      | ۳/۷۸ a                 | ۱۶۷۲۰ b                                | ۴۶۳۷/۵ b                          |
|                                             | LSD (0.05)                    |             | ۱۶/۵۳                         | ۳/۳۲                          | ۱/۰۳                   | ۲۱۵۷/۲                                 | ۷۴۱/۷۳                            |
| قطع آبیاری از<br>مرحله خورجین<br>دهی به بعد | عدم محلول پاشی                | OG × AL     | ۱۱۷/۶۴ a                      | ۱۸/۵۸ a                       | ۳/۶۰ a                 | ۱۳۳۰۱/۳ a                              | ۳۵۰۶/۵ a                          |
|                                             |                               | RGS × SLM   | ۱۱۳/۴۶ a                      | ۱۸/۲۰ ab                      | ۳/۵۲ a                 | ۱۲۸۲۳/۱ ab                             | ۳۴۶۴/۳ a                          |
|                                             |                               | DALGAN      | ۱۰۸/۸۲ a                      | ۱۷/۸۸ ab                      | ۳/۴۰ a                 | ۱۲۵۲۱/۸ ab                             | ۳۳۸۸/۷ a                          |
|                                             |                               | RGS 003     | ۸۷/۹۸ b                       | ۱۶/۲۵ b                       | ۲/۹۵ a                 | ۱۰۹۱۹/۱ bc                             | ۲۷۳۲/۸ b                          |
|                                             |                               | RGS × OKAPI | ۸۳/۷۲ b                       | ۱۶/۰۵ b                       | ۲/۸۴ a                 | ۱۰۲۹۸/۴ c                              | ۲۶۰۸/۵ b                          |
|                                             | LSD (0.05)                    |             | ۱۲/۲۳                         | ۲/۱۹                          | ۰/۸۸                   | ۱۹۶۳                                   | ۶۰۲/۰۸                            |
|                                             | محلول پاشی<br>(۴ گرم در لیتر) | OG × AL     | ۱۲۷/۵۳ a                      | ۱۸/۸۰ ab                      | ۳/۷۱ ab                | ۱۳۷۰۰/۷ ab                             | ۳۵۳۲ ab                           |
|                                             |                               | RGS × SLM   | ۱۳۴/۵۰ a                      | ۲۰/۹۷ a                       | ۴/۰۸ a                 | ۱۴۹۴۷/۱ a                              | ۴۱۲۴/۲ a                          |
|                                             |                               | DALGAN      | ۱۳۲/۱۹ a                      | ۲۰/۵۳ ab                      | ۳/۸۸ a                 | ۱۴۴۳۷/۵ a                              | ۴۰۱۷/۸ a                          |
|                                             |                               | RGS 003     | ۱۰۱/۹۸ b                      | ۱۷/۵۸ bc                      | ۳/۲۱ ab                | ۱۱۷۶۱/۶ bc                             | ۳۰۷۸/۵ bc                         |
|                                             |                               | RGS × OKAPI | ۹۰/۴۷ c                       | ۱۵/۶۵ c                       | ۲/۸۶ b                 | ۱۰۶۵۷ c                                | ۲۷۰۸/۶ c                          |
|                                             | LSD (0.05)                    |             | ۱۱/۴۰                         | ۳/۰۷                          | ۱/۰۱                   | ۲۰۲۳/۳                                 | ۶۱۹/۵۸                            |

میانگین‌های هر ستون با حروف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار می‌باشند.

جدول ۴-۱۰- مقایسه میانگین اثر سال بر عملکرد و اجزای عملکرد در کلزا

| سال     | تعداد دانه در خورجین<br>(عدد) | وزن هزار دانه<br>(گرم) | عملکرد بیولوژیکی<br>(کیلوگرم در هکتار) | عملکرد دانه<br>(کیلوگرم در هکتار) |
|---------|-------------------------------|------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------|
| سال اول | ۱۷/۵۸ b                       | ۲/۹۳ b                 | ۱۳۵۹۰/۱ b                              | ۳۶۱۷ b                            |
| سال دوم | ۲۰/۸۱ a                       | ۴/۲۵ a                 | ۱۶۱۱۵/۵ a                              | ۴۴۰۶/۷ a                          |

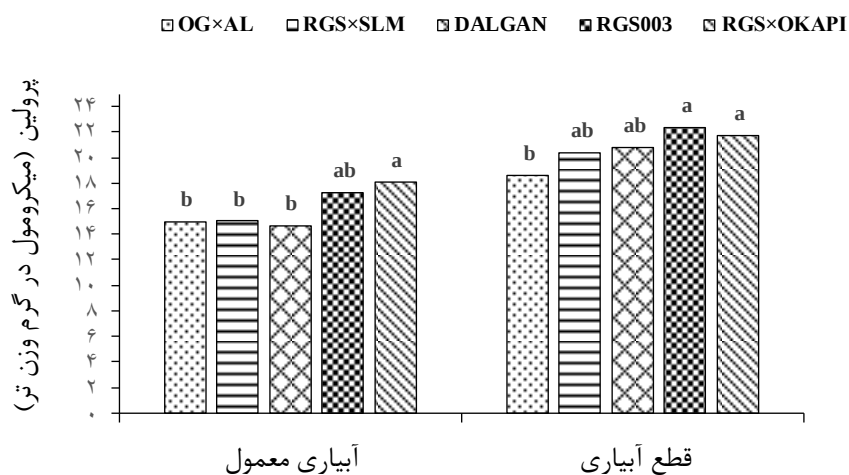
میانگین‌های هر ستون با حروف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار می‌باشند.

## ۴-۴- صفات بیوشیمیایی

### ۴-۴-۱- پرولین برگ

جدول تجزیه واریانس نشان داد که پرولین تحت تأثیر اثرات ساده، اثرات متقابل آبیاری×ژنوتیپ، آبیاری×سیلیکات پتاسیم×ژنوتیپ و سال×آبیاری×ژنوتیپ قرار گرفت (جدول ۴-۱۲). بررسی برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ نشان داد در شرایط آبیاری معمول بالاترین میزان پرولین برگ با ۱۸/۰۷ میکرومول در گرم وزن تر در ژنوتیپ RGS×OKAPI و کمترین میزان پرولین برگ با ۱۴/۶۶ میکرومول در گرم وزن تر در ژنوتیپ DALGAN مشاهده شد که با دو ژنوتیپ OG×AL و RGS×SLM در یک گروه آماری بودند. در شرایط قطع آبیاری نیز بالاترین میزان پرولین برگ به ژنوتیپ‌های RGS003 و RGS×OKAPI به ترتیب با میانگین ۱۸/۰۷ و ۱۷/۲۵ میکرومول در گرم وزن تر و کمترین به OG×AL تعلق گرفت (شکل ۴-۱۸). قطع آبیاری موجب افزایش پرولین برگ در ژنوتیپ‌های OG×AL، RGS×SLM، DALGAN، RGS003 و RGS×OKAPI به ترتیب با ۲۳/۹۷، ۳۵/۵۸، ۴۱/۸۳، ۲۹/۳۰ و ۲۰/۰۸ درصد نسبت به شاهد (آبیاری معمول) شد (شکل ۴-۱۸). میزان پرولین برگ در برهمکنش سه‌گانه آبیاری×سیلیکات پتاسیم×ژنوتیپ نشان داد در آبیاری معمول، بدون محلول‌پاشی کمترین میزان پرولین به ژنوتیپ OG×AL با ۱۵/۴۰ میکرومول در گرم وزن تر و بالاترین میزان پرولین برگ به چهار ژنوتیپ دیگر تعلق داشت که در یک گروه آماری بودند، در شرایط محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم ژنوتیپ‌های DALGAN و RGS×SLM به ترتیب با میانگین ۱۳/۷۰ و

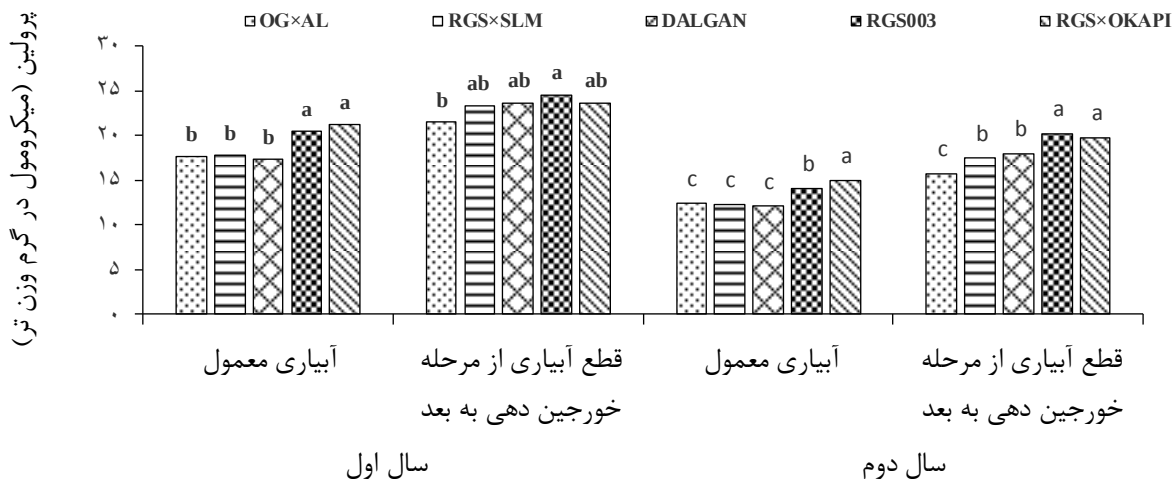
۱۳/۹۹ میکرومول در گرم وزن تر کمترین و ژنوتیپ RGS×OKAPI با ۱۸/۰۶ بیشترین میزان پرولین برگ را داشتند (جدول ۴-۱۳). در قطع آبیاری، بدون محلول پاشی نیز تمامی ژنوتیپ های مورد بررسی در یک گروه آماری قرار گرفتند و در شرایط محلول پاشی سیلیکات پتاسیم ژنوتیپ OG×AL با ۱۷/۲۸ میکرومول در گرم وزن تر کمترین و ژنوتیپ RGS003 با ۲۱/۸۱ میکرومول در گرم وزن تر بالاترین میزان پرولین برگ را داشتند (جدول ۴-۱۴). با توجه به اینکه در شرایط تنش خشکی و قطع آبیاری میزان پرولین افزایش می یابد، محلول پاشی سیلیکات پتاسیم توانست در جهت بهبود تنش خشکی عمل کند و براساس نتایج میزان پرولین برگ در شرایط آبیاری معمول و محلول پاشی سیلیکات پتاسیم نسبت به سایر تیمارها در کلیه ژنوتیپ ها کم تر بود (جدول ۴-۱۴).



شکل ۴-۱۸-برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ بر پرولین برگ به روش برش دهی. میانگین های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی دار ندارند.

میزان پرولین برگ در برهمکنش سال×آبیاری×ژنوتیپ نیز نشان داد که در سال زراعی اول، در ژنوتیپ های RGS003 و RGS×OKAPI به ترتیب با ۲۰/۴۰ و ۲۱/۱۷ میکرومول در گرم وزن تر در شرایط آبیاری معمول و در شرایط قطع آبیاری نیز ژنوتیپ RGS003 (۲۴/۴۷) میکرومول در گرم وزن تر) بیشترین میزان پرولین را داشتند. در سال زراعی دوم، ژنوتیپ RGS×OKAPI با میانگین ۱۴/۹۸

میکرومول در گرم وزن تر در شرایط آبیاری معمول و در شرایط قطع آبیاری ژنوتیپ‌های RGS003 و RGS×OKAPI بیشترین میزان پرولین برگ را داشتند (شکل ۴-۱۹).



شکل ۴-۱۹- برهمکنش اثر سه گانه سال×آبیاری×ژنوتیپ بر صفت پرولین برگ به روش برش دهی. میانگین‌های با

حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

در شرایط تنش خشکی، پرولین در حفظ پتانسیل اسمزی، حذف رادیکال‌های آزاد و ROS، حفاظت ماکرومولکول‌ها از تغییر شکل پروتئین، تنظیم pH سلولی نقش دارد. همچنین پرولین به عنوان منبع نیتروژن و کربن برای گیاهان تحت تنش شدید عمل می‌کند و تحمل گیاه در برابر تنش را افزایش می‌دهد (امینی و همکاران، ۲۰۱۵). تجمع پرولین با افزایش شدت تنش در نتیجه افزایش بیوسنتز پرولین و کاهش تخریب آن صورت می‌گیرد. همچنین توزیع پرولین در درون و بیرون سلول نقش مهمی در مقاومت اسمزی بافت‌های مختلف نسبت به تنش ایفا می‌کند. در شرایط کمبود آب اغلب بیوسنتز پرولین از گلوتامیک اسید در سیتوزول و کلروپلاست سلول‌های گیاهی اتفاق می‌افتد، بنابراین پرولین در سیتوزول تجمع یافته تا توزیع آب به درون سلول انجام شود. در شرایط نرمال پرولین به اندامک‌ها به ویژه واکوئول و پلاسمید انتقال می‌یابد و در صورتی که گیاه تحت شرایط تنش خشکی قرار گیرد پرولین از واکوئول به سیتوزول انتقال می‌یابد (لهمان و همکاران، ۲۰۱۰). تجمع پرولین در

شرایط تنش به واسطه سنتز پرولین و غیر فعال شدن 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 می‌گردد (بروجردنیا و همکاران، ۱۳۹۵). افزایش میزان پرولین در مطالعات بسیاری تحت تنش خشکی گزارش شده است (قربانلی و همکاران، ۲۰۱۳). میزان پرولین برگ در شرایط قطع آبیاری به دلیل نقش خود در تنظیم اسمزی افزایش می‌یابد، این امر موجب حفظ تورژسانس سلول‌ها می‌شود که نقش حفظ کننده گیاه در شرایط تنش خشکی را بر عهده دارد که میزان آن در ژنوتیپ‌های متحمل به تنش خشکی بیشتر می‌باشد (آرانج‌وللو و همکاران، ۲۰۱۱؛ میرزایی و همکاران، ۱۳۹۲). 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 (ابراهیمیان و همکاران، ۲۰۱۲). گزارشات بسیاری وجود دارد که نشان می‌دهند کاربرد ترکیبات سیلیکاتی همچنین می‌تواند تحمل گیاه به شوری و خشکی را با اصلاح سطح املاحی مانند: پرولین (لی و همکاران، ۲۰۱۰؛ یین و همکاران، ۲۰۱۳)، گلیسین بتائین (ترابی و همکاران، ۲۰۱۵)، کربوهیدرات‌ها (مینگ و همکاران، ۲۰۱۲)، پلیول‌ها، ترکیبات آنتی اکسیدانی مانند فنولیک‌های کل (هاشمی و همکاران، ۲۰۱۰)، قندهای محلول و اسیدهای آمینه آزاد (حاجی بلند و همکاران، ۲۰۱۶؛ سونوبی و همکاران، ۲۰۱۰) افزایش دهد، که شوک اسمزی ناشی از تنش را به حداقل می‌رساند. بهبود پتانسیل اسمزی با افزایش اسمولیت‌ها توسط Si می‌تواند با فعالیت فتوسنتزی بالا و رشد بهتر گیاه تحت شرایط تنش مرتبط باشد (پیرا و همکاران، ۲۰۱۳).

## ۴-۲ کلروفیل a

نتایج تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که اثرات ساده آبیاری، سیلیکات‌پتاسیم و ژنوتیپ در سطح یک درصد بر این صفت معنی‌دار بود (جدول ۴-۱۱). بیشترین محتوای کلروفیل a در شرایط

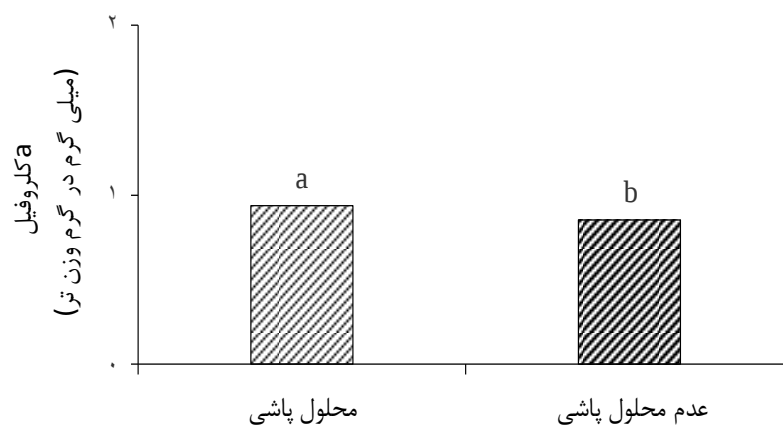
<sup>1</sup> Polyols

آبیاری معمول ۱/۰۷ میلی گرم در گرم وزن تر بود که میزان آن در شرایط قطع آبیاری ۳۳ درصد کاهش یافت (شکل ۴-۲۰). رنگدانه‌های کلروفیل تحت شرایط خشکی در گیاه کلزا کاهش یافت (اولا و همکاران، ۲۰۱۲؛ خان و همکاران، ۲۰۱۰؛ شفیق و همکاران، ۲۰۱۴). کاهش رنگدانه‌های فتوسنتزی ممکن است به دلیل کاهش سنتز کمپلکس‌های رنگدانه‌ای کد شده بوسیله گروه ژنی *cab* و یا تخریب نوری کمپلکس‌های پروتئینی رنگدانه *a* و *b* که کار آنها محافظت از وضعیت فتوسنتزی است، یا ممکن است به دلیل تخریب اکسیداتیو لیپیدهای کلروپلاست، پروتئین‌ها و یا رنگدانه‌ها باشد. مطالعات نشان می‌دهد در شرایط تنش خشکی میزان آبسزیکاسید در برگ‌ها، ساقه‌ها و ریشه‌ها افزایش می‌یابد. در این شرایط آبسزیکاسید سرعت فتوسنتز و مقدار کلروفیل برگ را کاهش می‌دهد. همچنین در شرایط تنش خشکی و به دنبال آن بسته شدن روزنه‌ها و کاهش تبادلات گازی میزان و سرعت فتوسنتز کاهش می‌یابد، در این شرایط محتوای کلروفیل نیز کاهش می‌یابد (ردی و همکاران، ۲۰۰۴). محتوای کلروفیل *a* در شرایط عدم محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم ۰/۸۵ میلی‌گرم در گرم وزن تر بود که میزان آن با کاربرد سیلیکات‌پتاسیم ۹ درصد افزایش یافت (شکل ۴-۲۱). در مطالعه حاضر، تغذیه سیلیکات‌پتاسیم می‌تواند میزان کلروفیل *a* را در کلزا تحت تنش خشکی تا حدی بازیابی کند. مطالعات گذشته به تأثیر مثبت سیلیکون در بهبود محتوای کلروفیل خرفه (*Portulaca oleracea* L.) تحت تنش اشاره کرده‌اند (کافی و رحیمی، ۲۰۱۱). شاید بتوان علت این تأثیر را جریان احتمالی سیلیکون در بیوسنتز کلروفیل‌های جدید و محافظت از کلروفیل‌های موجود در برابر تنش اکسیداتیو ناشی تنش خشکی دانست (شکاری و همکاران، ۲۰۱۵). محتوای کلروفیل *a* در ژنوتیپ‌های مختلف

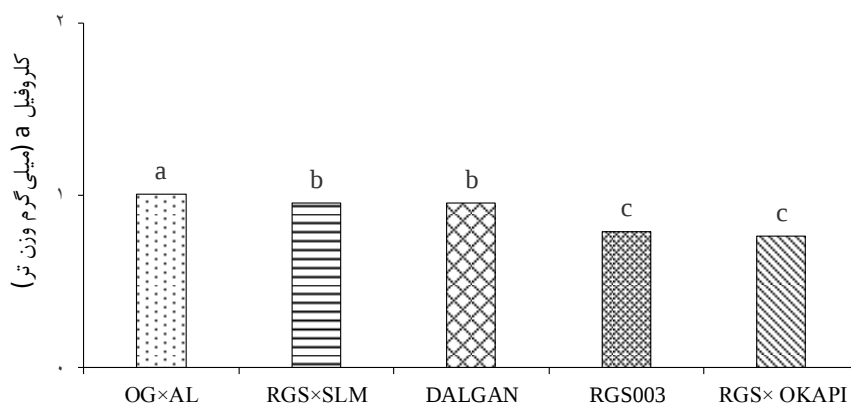
کلزا به دلیل ماهیت ژنتیکی متفاوت، واکنش متفاوتی نشان دادند. بیشترین محتوای کلروفیل a به ژنوتیپ OG×AL با میانگین ۱/۰۰۴ میلی گرم در وزن تر و کمترین به ژنوتیپ‌های RGS003 و RGS×OKAPI به ترتیب با میانگین ۰/۷۹ و ۰/۷۶ میلی گرم در وزن تر تعلق داشت (شکل ۴-۲۲). محتوای کلروفیل در ارقام کلزا روغنی (*Brassica napus*) تحت تأثیر ژنوتیپ و محیط است (وارد، ۱۹۹۰).



شکل ۴-۲۰- مقایسه میانگین اثر آبیاری بر کلروفیل a به روش برش دهی. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.



شکل ۴-۲۱- مقایسه میانگین اثر سیلیکات‌پتاسیم بر کلروفیل a به روش برش دهی. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

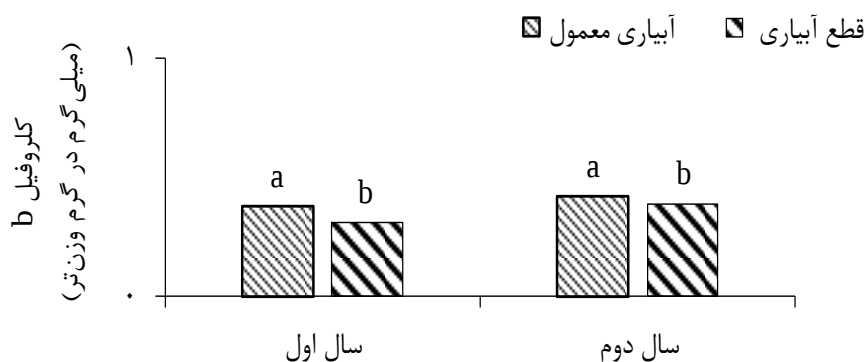


شکل ۴-۲۲- مقایسه میانگین اثر ژنوتیپ بر کلروفیل a به روش برش دهی. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

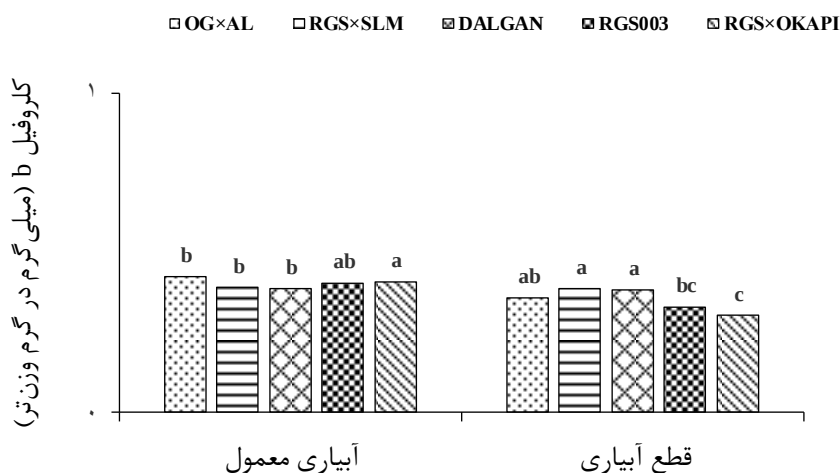
#### ۴-۳-۴ کلروفیل b

جدول تجزیه واریانس نشان داد که محتوای کلروفیل b تحت تأثیر اثرات ساده سال، آبیاری و ژنوتیپ، اثر متقابل سال×آبیاری، آبیاری×ژنوتیپ و اثر سه‌گانه آبیاری×سیلیکات پتاسیم×ژنوتیپ قرار گرفت (جدول ۴-۱۱). بررسی برهمکنش سال×آبیاری بر صفت میزان کلروفیل b در برگ نشان داد در هر دو سال زراعی قطع آبیاری موجب کاهش میزان کلروفیل b شد. به طوری که قطع آبیاری در سال اول موجب ۱۸/۴۲ درصد و در سال دوم ۷/۱۴ درصد کاهش کلروفیل b شد (شکل ۴-۲۳). سال دوم زراعی به دلیل بارندگی بیشتر نسبت به سال اول زراعی، میزان کلروفیل b بالاتری داشت. بیشترین مقدار کلروفیل b (۰/۴۲ میلی گرم در گرم وزن تر) در سال دوم آزمایش و در شرایط آبیاری معمول حاصل شد (شکل ۴-۲۳). بررسی مقایسه میانگین برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ نشان داد که قطع آبیاری باعث کاهش میزان کلروفیل b در تمامی ژنوتیپ‌های مورد بررسی شد به طوری که ژنوتیپ RGS×OKAPI با ۲۹ درصد کاهش نسبت به شاهد بیشترین تأثیر منفی در صفت کلروفیل b را نشان داد (شکل ۴-۲۴). محتوای کلروفیل b در برهمکنش سه‌گانه آبیاری×سیلیکات پتاسیم×ژنوتیپ نشان داد که در شرایط آبیاری معمول، بدون محلول‌پاشی ژنوتیپ‌ها در یک گروه آماری واقع شدند و

در شرایط محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم، بیشترین میانگین محتوای کلروفیل b در ژنوتیپ‌های OG×AL (۰/۴۴۲ میلی گرم در گرم وزن تر) و RGS×OKAPI (۰/۴۴۳ میلی گرم در گرم وزن تر) و کمترین در ژنوتیپ‌های DALGAN و RGS×SLM (۰/۳۶۸ میلی گرم در گرم وزن تر) بدست آمد. درحالی که در شرایط قطع آبیاری، بدون محلول‌پاشی نیز تمامی ژنوتیپ‌ها در یک گروه آماری واقع شدند و در شرایط محلول‌پاشی بیشترین میانگین به ژنوتیپ RGS×SLM (۰/۴۱۷ میلی گرم در گرم وزن تر) و کمترین به ژنوتیپ RGS×OKAPI (۰/۲۹۳ میلی گرم در گرم وزن تر) تعلق داشت (جدول ۴-۱۳).



شکل ۴-۲۳- برهمکنش سال×آبیاری بر کلروفیل b به روش برش دهی. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.



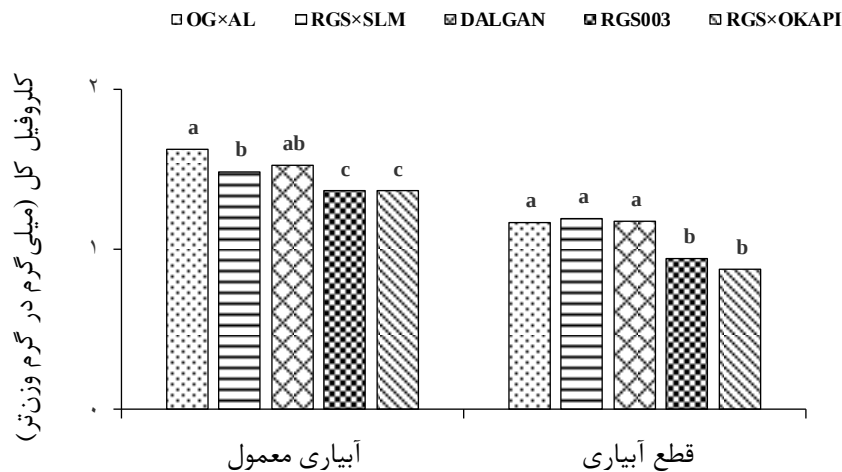
شکل ۴-۲۴- برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ بر کلروفیل b به روش برش دهی. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

تنش خشکی با نقش در سنتز آنزیم آسزیک اسید در برگ‌ها باعث کاهش میزان کلروفیل در برگ می‌گردد. به طور کلی تنش خشکی با بسته شدن روزنه‌ها و کاهش تبادلات گازی میزان فتوسنتز را تحت تأثیر قرار می‌دهد، در این شرایط میزان کلروفیل برگ نیز کاهش می‌یابد. با توجه به ماهیت مشابه کلروفیل a و کلروفیل b دلایل کاهش این دو در شرایط تنش خشکی مشابه می‌باشد. نتایج تحقیق مراد بیگی و همکاران (۱۳۹۸) نشان داد که کلروفیل b در شرایط تنش خشکی کاهش یافت، این کاهش از ۰/۳۱ به ۰/۲۷ میلی‌گرم در گرم وزن تر بود. در تحقیقی نیز که بر روی ذرت انجام شد، مقدار محتوای کلروفیل و فتوسنتز در شرایط تنش خشکی کاهش یافت و کاربرد ترکیبات سیلیکاتی در این شرایط منجر به افزایش پارامترهای فیزیولوژیکی و در نتیجه بهبود عملکرد گردید (کایا و همکاران، ۲۰۰۶).

#### ۴-۴-۴ کلروفیل کل

جدول تجزیه واریانس نشان داد که میزان کلروفیل کل تحت تأثیر اثرات ساده آبیاری، سیلیکات‌پتاسیم و ژنوتیپ، اثرات متقابل آبیاری×ژنوتیپ و آبیاری×سیلیکات‌پتاسیم×ژنوتیپ قرار گرفت (جدول ۴-۱۱). اثر متقابل آبیاری×ژنوتیپ نشان داد که قطع آبیاری موجب کاهش ۲۸/۲۰، ۱۹/۵۹، ۲۳/۰۹، ۳۰/۸۸ و ۳۶/۰۲ درصدی به ترتیب در ژنوتیپ‌های OG×AL، RGS×SLM، DALGAN، RGS003 و RGS×OKAPI شد (شکل ۴-۲۵). برهمکنش سه‌گانه آبیاری×سیلیکات‌پتاسیم×ژنوتیپ نیز نشان داد در شرایط آبیاری معمول، بدون محلول‌پاشی ژنوتیپ‌های OG×AL و DALGAN به ترتیب با میانگین ۱/۵۳ و ۱/۵۱ میلی‌گرم در گرم وزن تر بیشترین و RGS×OKAPI (۱/۲۸ میلی‌گرم در گرم وزن تر) کمترین میزان کلروفیل کل را داشتند. در شرایط آبیاری معمول، با محلول‌پاشی ژنوتیپ‌های OG×AL با ۱/۷۱ میلی‌گرم در گرم وزن تر بیشترین مقدار کلروفیل را داشت. در قطع آبیاری، بدون محلول‌پاشی ژنوتیپ‌های OG×AL، RGS×SLM و DALGAN با میانگین ۱/۱۴، ۱/۱۰ و ۱/۰۸ بیشترین میزان کلروفیل کل را داشتند و

در یک گروه آماری قرار داشتند و در شرایط محلول پاشی نیز ژنوتیپ‌های  $OG \times AL$ ،  $RGS \times SLM$  و DALGAN با میانگین ۱/۱۸، ۱/۲۹ و ۱/۲۶ بیشترین میزان کلروفیل کل را داشتند (جدول ۴-۱۳). محلول پاشی سیلیکات پتاسیم در شرایط آبیاری کامل و قطع آبیاری توانست مقدار کلروفیل کل برگ را افزایش دهد.



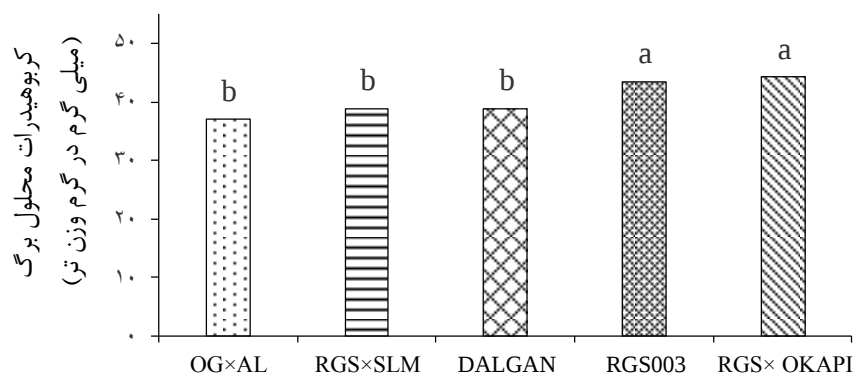
شکل ۴-۲۵-برهمکنش آبیاری  $\times$  ژنوتیپ بر کلروفیل کل به روش برش دهی. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

کلروفیل رنگدانه اصلی جهت فتوسنتز در گیاهان است، که در فرایند جذب، انتقال و توزیع انرژی نوری دخیل است (بیسوال و همکاران، ۲۰۱۲). کلروفیل به عنوان 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 شکستن کلروپلاست‌ها و کاهش میزان کلروفیل و توقف تولید آن همراه است، که این عمل به دلیل تجزیه پروتئین‌ها و در نتیجه افزایش آمینواسیدها همچون پرولین می‌باشد (اسماعیلی‌منزه و همکاران، ۱۳۹۱). در ضمن محققان نشان دادند که در گیاهانی که با ترکیبات سیلیکاتی محلول پاشی شدند، مراکز واکنش فتوسیستم دو (PSII) بیشتر باز بودند، که ممکن است برای انتقال الکترونی تحت تنش خشکی انرژی بیشتری مورد استفاده قرار گیرد (ژو و

همکاران ۲۰۱۶). طی دهه‌های اخیر، مطالعات بیشماری نشان داده‌اند که ترکیبات سیلیکاتی باعث افزایش رشد گیاه، محتوای کلروفیل و فعالیت فتوسنتزی (کیم و همکاران، ۲۰۱۴؛ فاروق و همکاران، ۲۰۱۶) و بهبود دفاع آنتی‌اکسیدانی و کاهش آسیب اکسیداتیو (شی و همکاران، ۲۰۱۶) در گیاهان زراعی می‌شود. ترکیبات سیلیکاتی در گندم باعث بهبود مقدار کلروفیل برگ (ما و همکاران، ۲۰۱۶) و میزان فتوسنتز (ستار و همکاران، ۲۰۱۷) شد. کاربرد ترکیبات سیلیکاتی در شرایط تنش خشکی در کلزا (حسن‌اوزمان و همکاران، ۲۰۱۸) باعث محافظت از رنگدانه‌های فتوسنتزی، در خیار باعث افزایش کلروفیل کل و میزان فتوسنتز (اوزونیدو و همکاران، ۲۰۱۶)، در گوجه‌فرنگی منجر به حفظ ساختار غشای کلروپلاست (کائو و همکاران، ۲۰۱۵) و در گیاه سویا (شن و همکاران، ۲۰۱۰) باعث افزایش کلروفیل کل گردید.

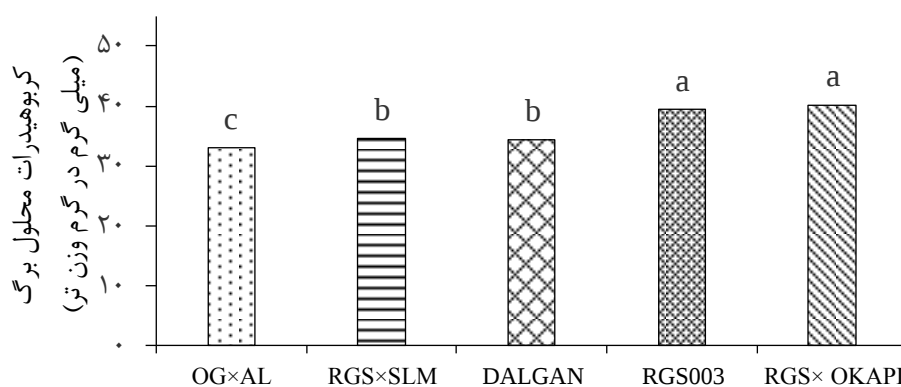
#### ۴-۴-۵ میزان کربوهیدرات محلول برگ

با توجه به نتایج آزمون بارتلت این صفت به صورت جداگانه در دو سال زراعی ۹۵-۹۶ و ۹۶-۹۷ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تجربه واریانس صفت مورد بررسی نشان داد که اثرات ساده و برهمکنش آبیاری×سیلیکات پتاسیم در هر دو سال زراعی معنی‌دار بود (جدول ۴-۱۲). ژنوتیپ‌های مختلف کلزا به دلیل ماهیت ژنتیکی متفاوت واکنش متفاوتی نشان دادند. نتایج مقایسه میانگین اثر ژنوتیپ بر صفت میزان کربوهیدرات محلول برگ در سال اول آزمایش نشان داد، بیشترین میزان کربوهیدرات محلول برگ در ژنوتیپ‌های RGS×OKAPI و RGS003 به ترتیب با میانگین ۴۴/۳۰ و ۴۳/۵۲ میلی‌گرم در گرم وزن تر بدست آمد، در حالی که کمترین میزان کربوهیدرات محلول برگ در ژنوتیپ‌های OG×AL، RGS×SLM و DALGAN به ترتیب با میانگین ۳۷/۱۷، ۳۸/۹۰ و ۳۸/۹۵ میلی‌گرم در گرم وزن تر بدست آمد (شکل ۴-۲۶).

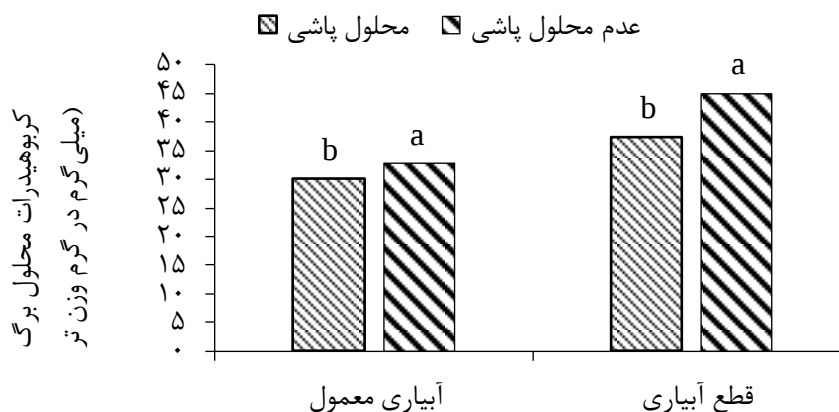


شکل ۴-۲۶- مقایسه میانگین اثر ساده ژنوتیپ بر کربوهیدرات محلول برگ در سال زراعی اول (۹۵-۹۶). میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

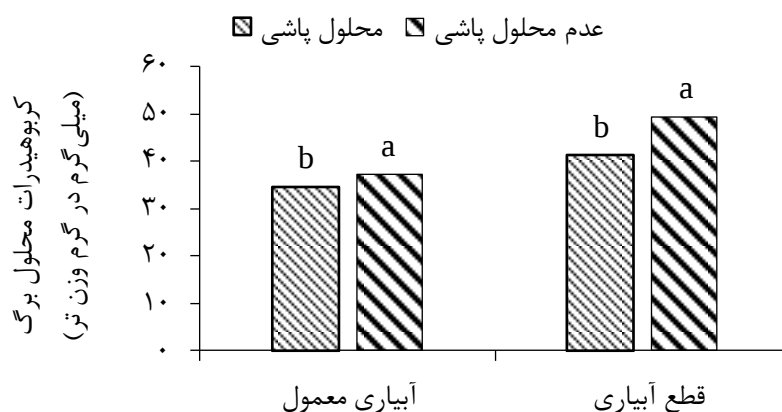
نتایج مقایسه میانگین اثر ژنوتیپ بر میزان کربوهیدرات محلول برگ در سال دوم آزمایش نشان داد، بیشترین میزان کربوهیدرات محلول برگ در ژنوتیپ‌های RGS×OKAPI و RGS003 به ترتیب با میانگین ۴۰/۱۴ و ۳۹/۴۵ میلی‌گرم در گرم وزن تر بدست آمد، در حالی که کمترین میزان کربوهیدرات محلول برگ در ژنوتیپ OG×AL با میانگین ۳۳/۱۰ میلی‌گرم در گرم وزن تر بدست آمد (شکل ۴-۲۷).



شکل ۴-۲۷- مقایسه میانگین اثر ساده ژنوتیپ بر کربوهیدرات محلول برگ در سال زراعی دوم (۹۶-۹۷). میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.



شکل ۴-۲۸- برهمکنش آبیاری×سیلیکات پتاسیم بر کربوهیدرات محلول برگ در سال زراعی اول (۹۵-۹۶) به روش برش دهی. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی دار ندارند.



شکل ۴-۲۹- برهمکنش آبیاری×سیلیکات پتاسیم بر کربوهیدرات محلول برگ در سال زراعی دوم (۹۶-۹۷) به روش برش دهی. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی دار ندارند.

برهمکنش آبیاری×سیلیکات پتاسیم بر میزان کربوهیدرات محلول برگ در سال زراعی اول نشان داد که در آبیاری معمول، محلول پاشی باعث کاهش ۷ درصدی نسبت به تیمار شاهد شد و در شرایط قطع آبیاری نیز محلول پاشی باعث کاهش ۱۷ درصدی نسبت به عدم محلول پاشی شد (شکل ۴-۲۸). برهمکنش آبیاری×سیلیکات پتاسیم بر میزان کربوهیدرات محلول برگ در سال زراعی دوم نیز نشان داد که در آبیاری معمول، محلول پاشی باعث کاهش ۸ درصدی نسبت به عدم محلول پاشی شد و در شرایط قطع آبیاری نیز محلول پاشی باعث کاهش ۱۷ درصدی نسبت به عدم محلول پاشی شد (شکل

۴-۲۹). کربوهیدرات محلول برگ همچون پرولین در شرایط کم آبی و تنش خشکی در برگ‌ها افزایش یافت و سیلیکات پتاسیم توانست باعث کاهش کربوهیدرات محلول برگ در هر دو شرایط آبیاری و قطع آبیاری گردد.

محققین در بررسی‌های خود نشان دادند که در ارقام مختلف کلزا تحت تنش خشکی مقادیر متفاوتی از قندهای محلول مشاهده شد (میرزایی و همکاران، ۱۳۹۲). افزایش مقدار کربوهیدرات محلول بر اثر تنش خشکی در کلزا (کرکگارد و همکاران، ۲۰۰۸)، کنجد (آئین، ۱۳۹۱)، کتان روغنی (پاریدا و همکاران، ۲۰۰۸) و برنج (پیردشتی و همکاران، ۲۰۰۹) نیز گزارش شده است. به عقیده برخی محققین در طول دوره تنش، قندها به عنوان یکی از مکانیسم‌های مقاومت عمل می‌کنند (بای و همکاران، ۲۰۱۳؛ اسلاما و همکاران، ۲۰۰۷). قندهای محلول می‌توانند نقش مهمی در تنظیم اسمزی سلول‌ها داشته باشند و برخی گیاهان مانند کلزا از طریق تجمع مقدار زیادی مواد محافظت کننده اسمزی مانند قندهای محلول می‌توانند به طور چشمگیری نسبت به تنش‌های دمای بالا و خشکی مقاومت نمایند و ظرفیت پایین در تجمع محافظت کننده‌های اسمزی مانند قندها یکی از دلایل ضعف گیاهان در شرایط تنش عنوان شده است (بای و همکاران، ۲۰۱۳). تجمع کربوهیدرات‌های محلول نتیجه برخی فعل و انفعالات متابولیکی است که در نتیجه باعث اختلال در تشکیل و یا انتقال فرآورده‌های فتوسنتزی برگ می‌شود که در نهایت منجر به ممانعت از فتوسنتز در شرایط تنش خشکی می‌گردد (ژو و همکاران، ۲۰۱۳). افزایش کربوهیدرات‌های محلول در فرآیند سازگاری گیاه به تنش اهمیت بسزایی دارد. تجمع بیشتر این مواد در پنبه و در شرایط تنش خشکی نیز گزارش شده است (ظهور و همکاران، ۲۰۱۷). علاوه بر کاهش تثبیت کربن در طی تنش خشکی به علت بسته شدن روزنه‌ها و کاهش بیان ژن‌های مربوط به سیکل کلوین، میزان گلوکز و فروکتوز در برگ‌ها نیز افزایش می‌یابد. در تنش خشکی بیان ژن‌های کد کننده آنزیم‌های (فروکتوز ۱ و ۶ بیس فسفات آلدولاز، فروکتوز بیس فسفاتاز و فسفوکوکوموتاز) درگیر در تولید گلوکز از تریوزفسفات‌ها

کاهش می‌یابد. کاهش بیان این ژن‌ها احتمالاً به علت کاهش مقدار تولید تریوزفسفات‌ها و انتقال آن‌ها از کلروپلاست می‌باشد. در صورتی که بیان ژن‌های مربوط به هیدرولیز ساکارز افزایش می‌یابد که منجر به افزایش گلوکز و فروکتوز و کاهش ساکارز در برگ‌ها می‌گردد (زو و همکاران، ۲۰۰۸). علاوه بر این، ترکیبات سیلیکاتی در شرایط تنش خشکی اثرات بسیاری در گیاهان دارد اما متأسفانه مطالعات محدودی در این زمینه صورت گرفته است. همتی و همکاران (۱۳۹۸) در بررسی خود نشان دادند محلول پاشی سیلیکات سدیم باعث افزایش میزان کربوهیدرات محلول برگ کلزا گردید. همچنین، کاربرد سیلیکات پتاسیم باعث افزایش لیگنین، سلولز، پکتین، کربوهیدرات محلول برگ در برنج تحت شرایط خشکی شد (امام و همکاران، ۲۰۱۴)، که نتایج آن‌ها بر روی کربوهیدرات محلول برگ با نتایج آزمایش ما مطابقت داشت.

جدول ۴-۱۱- نتایج تجزیه مرکب صفات بیوشیمیایی کلزا

| منابع تغییرات                          | درجه آزادی | پرولین برگ          | کلروفیل a             | کلروفیل b             | کلروفیل کل           |
|----------------------------------------|------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| سال                                    | ۱          | ۸۷۷/۵ **            | ۰/۱۴۹۱۱ <sup>ns</sup> | ۰/۱۱۱۶ *              | ۰/۵۲ <sup>ns</sup>   |
| سال (تکرار)                            | ۴          | ۴/۳۰                | ۰/۰۳۰۳۴               | ۰/۰۱۰۲                | ۰/۰۷۴                |
| آبیاری                                 | ۱          | ۶۷۷/۹۲ **           | ۳/۷۷۷۲ **             | ۰/۰۶۹۱ **             | ۴/۸۹ **              |
| سال × آبیاری                           | ۱          | ۲/۱۴ <sup>ns</sup>  | ۰/۰۶۸۸۴ <sup>ns</sup> | ۰/۰۱۶۳ *              | ۰/۰۲ <sup>ns</sup>   |
| سیلیکات پتاسیم                         | ۱          | ۴۶/۸۷ **            | ۰/۲۰۷۵ **             | ۰/۰۰۱۹ <sup>ns</sup>  | ۰/۲۶ **              |
| سال × سیلیکات پتاسیم                   | ۱          | ۰/۰۶ <sup>ns</sup>  | ۰/۰۰۰۲۴ <sup>ns</sup> | ۰/۰۰۰۷ <sup>ns</sup>  | ۰/۰۰۰۱ <sup>ns</sup> |
| آبیاری × سیلیکات پتاسیم                | ۱          | ۰/۲۶ <sup>ns</sup>  | ۰/۰۰۰۰۴ <sup>ns</sup> | ۰/۰۰۳۲ <sup>ns</sup>  | ۰/۰۰۱۸ <sup>ns</sup> |
| سال × آبیاری × سیلیکات پتاسیم          | ۱          | ۲/۹۵ <sup>ns</sup>  | ۰/۰۰۰۳۷ <sup>ns</sup> | ۰/۰۰۲۱ <sup>ns</sup>  | ۰/۰۰۴۳ <sup>ns</sup> |
| خطای (الف)                             | ۱۲         | ۱/۹۱                | ۰/۰۱۵۷۵               | ۰/۰۰۲۲                | ۰/۰۲۵                |
| ژنوتیپ                                 | ۴          | ۴۵/۳۹ **            | ۰/۲۸۹۸ **             | ۰/۰۰۵۷ **             | ۰/۳۷۵ **             |
| سال × ژنوتیپ                           | ۴          | ۰/۳۵ <sup>ns</sup>  | ۰/۰۰۱۰۱ <sup>ns</sup> | ۰/۰۰۱ <sup>ns</sup>   | ۰/۰۰۰۲ <sup>ns</sup> |
| آبیاری × ژنوتیپ                        | ۴          | ۷/۴۲ **             | ۰/۰۱۱۴ <sup>ns</sup>  | ۰/۰۱۳۴ **             | ۰/۰۴۲ **             |
| سال × آبیاری × ژنوتیپ                  | ۴          | ۳/۲۲ *              | ۰/۰۰۲۱۸ <sup>ns</sup> | ۰/۰۰۱۸ <sup>ns</sup>  | ۰/۰۰۸ <sup>ns</sup>  |
| سیلیکات پتاسیم × ژنوتیپ                | ۴          | ۰/۹۵ <sup>ns</sup>  | ۰/۰۰۰۷۸ <sup>ns</sup> | ۰/۰۰۰۰۳ <sup>ns</sup> | ۰/۰۰۰۹ <sup>ns</sup> |
| سال × سیلیکات پتاسیم × ژنوتیپ          | ۴          | ۰/۱ <sup>ns</sup>   | ۰/۰۰۰۳۵ <sup>ns</sup> | ۰/۰۰۰۱ <sup>ns</sup>  | ۰/۰۰۰۳ <sup>ns</sup> |
| آبیاری × سیلیکات پتاسیم × ژنوتیپ       | ۴          | ۸/۴۷ **             | ۰/۰۱۱۴۵ <sup>ns</sup> | ۰/۰۰۸۱ **             | ۰/۰۳۷ **             |
| سال × آبیاری × سیلیکات پتاسیم × ژنوتیپ | ۴          | ۰/۱۰۲ <sup>ns</sup> | ۰/۰۰۱۵۱ <sup>ns</sup> | ۰/۰۰۰۳ <sup>ns</sup>  | ۰/۰۰۲۸ <sup>ns</sup> |
| خطای (ب)                               | ۶۴         | ۱/۱۵                | ۰/۰۰۴۵۷               | ۰/۰۰۱۳                | ۰/۰۰۸۷               |
| ضریب تغییرات (/.)                      |            | ۵/۸۴                | ۷/۵۷                  | ۹/۴۸                  | ۷/۳۲                 |

\*, \*\*, و <sup>ns</sup> به ترتیب معنی‌داری در سطوح احتمال پنج و یک درصد و عدم معنی دار.

جدول ۴-۱۲- تجزیه واریانس کربوهیدرات محلول برگ تحت تأثیر آبیاری، محلول پاشی و ژنوتیپ کلزا در دو سال زراعی

| میانگین مربعات        |            |                                  |
|-----------------------|------------|----------------------------------|
| سال اول زراعی (۹۵-۹۶) |            | منابع تغییرات                    |
| کربوهیدرات محلول برگ  | درجه آزادی |                                  |
| ۳۵/۳۸ <sup>ns</sup>   | ۲          | بلوک                             |
| ۱۳۴۹/۵۷**             | ۱          | آبیاری                           |
| ۴۱۸/۵۹**              | ۱          | سیلیکات پتاسیم                   |
| ۱۲۳/۲۶*               | ۱          | آبیاری × سیلیکات پتاسیم          |
| ۱۱/۰۹                 | ۶          | خطای (الف)                       |
| ۱۱۸/۷۶**              | ۴          | ژنوتیپ                           |
| ۱/۸۷ <sup>ns</sup>    | ۴          | آبیاری × ژنوتیپ                  |
| ۰/۶۰ <sup>ns</sup>    | ۴          | سیلیکات پتاسیم × ژنوتیپ          |
| ۰/۳۷ <sup>ns</sup>    | ۴          | آبیاری × سیلیکات پتاسیم × ژنوتیپ |
| ۹/۰۹                  | ۳۲         | خطای دوم                         |
| ۷/۴۳                  |            | ضریب تغییرات (/.)                |
| سال دوم زراعی (۹۶-۹۷) |            |                                  |
| کربوهیدرات محلول برگ  | درجه آزادی | منابع تغییرات                    |
| ۲/۵۲ <sup>ns</sup>    | ۲          | بلوک                             |
| ۱۴۱۶/۳۹**             | ۱          | آبیاری                           |
| ۳۹۲/۸۰**              | ۱          | سیلیکات پتاسیم                   |
| ۹۵/۲۰**               | ۱          | آبیاری × سیلیکات پتاسیم          |
| ۵/۷۰                  | ۶          | خطای (الف)                       |
| ۱۲۴/۳۱**              | ۴          | ژنوتیپ                           |
| ۰/۴۲ <sup>ns</sup>    | ۴          | آبیاری × ژنوتیپ                  |
| ۰/۲۵ <sup>ns</sup>    | ۴          | سیلیکات پتاسیم × ژنوتیپ          |
| ۰/۲۷ <sup>ns</sup>    | ۴          | آبیاری × سیلیکات پتاسیم × ژنوتیپ |
| ۱/۷۰                  | ۳۲         | خطای دوم                         |
| ۳/۵۹                  |            | ضریب تغییرات (/.)                |

\*, \*\*, و ns به ترتیب معنی داری در سطوح احتمال پنج و یک درصد و عدم معنی دار.

جدول ۴-۱۳- مقایسه میانگین برهمکنش سه گانه آبیاری × سیلیکات پتاسیم × ژنوتیپ بر صفات مورد بررسی به روش

برش دهی

| آبیاری                                         | محلول پاشی<br>سیلیکات پتاسیم  | ژنوتیپ      | پرولین برگ<br>(میکرومول در<br>گرم وزن تر) | کلروفیل b<br>(میلی گرم در گرم<br>وزن تر) | کلروفیل کل<br>(میلی گرم در<br>گرم وزن تر) |
|------------------------------------------------|-------------------------------|-------------|-------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------|
| شاهد                                           | عدم محلول پاشی                | OG × AL     | ۱۵/۴۰ ab                                  | ۰/۴۰۳ a                                  | ۱/۵۳ a                                    |
|                                                |                               | RGS × SLM   | ۱۶/۰۸ a                                   | ۰/۴۰۲ a                                  | ۱/۴۷ ab                                   |
|                                                |                               | DALGAN      | ۱۵/۶۲ a                                   | ۰/۴۰۲ a                                  | ۱/۵۱ a                                    |
|                                                |                               | RGS 003     | ۱۷/۷۲ a                                   | ۰/۴۱۳ a                                  | ۱/۳۳ bc                                   |
|                                                |                               | RGS × OKAPI | ۱۸/۰۹ a                                   | ۰/۳۸۸ a                                  | ۱/۲۸ c                                    |
|                                                | LSD (0.05)                    |             | ۴/۱۹                                      | ۰/۰۵۵                                    | ۰/۱۷                                      |
|                                                | محلول پاشی<br>(۴ گرم در لیتر) | OG × AL     | ۱۴/۶۲ ab                                  | ۰/۴۴۲ a                                  | ۱/۷۱ a                                    |
|                                                |                               | RGS × SLM   | ۱۳/۹۹ b                                   | ۰/۳۶۸ b                                  | ۱/۵۰ b                                    |
|                                                |                               | DALGAN      | ۱۳/۷۰ b                                   | ۰/۳۶۸ b                                  | ۱/۵۲ b                                    |
|                                                |                               | RGS 003     | ۱۶/۷۸ ab                                  | ۰/۳۹۵ ab                                 | ۱/۴۰ b                                    |
|                                                |                               | RGS × OKAPI | ۱۸/۰۶ a                                   | ۰/۴۲۳ a                                  | ۱/۴۴ b                                    |
|                                                | LSD (0.05)                    |             | ۳/۸۶                                      | ۰/۰۵۱                                    | ۰/۱۳                                      |
| قطع آبیاری<br>از مرحله<br>خورجین<br>دهی به بعد | عدم محلول پاشی                | OG × AL     | ۱۹/۹۵ a                                   | ۰/۳۷۰ a                                  | ۱/۱۴ a                                    |
|                                                |                               | RGS × SLM   | ۲۰/۳۳ a                                   | ۰/۳۶۲ a                                  | ۱/۱۰ a                                    |
|                                                |                               | DALGAN      | ۲۰/۷۶ a                                   | ۰/۳۵۸ a                                  | ۱/۰۸ a                                    |
|                                                |                               | RGS 003     | ۲۲/۸۰ a                                   | ۰/۳۱۷ a                                  | ۰/۸۹ b                                    |
|                                                |                               | RGS × OKAPI | ۲۳/۳۳ a                                   | ۰/۳۱۰ a                                  | ۰/۸۶ b                                    |
|                                                | LSD (0.05)                    |             | ۳/۶۶                                      | ۰/۰۸۲                                    | ۰/۱۴                                      |
|                                                | محلول پاشی<br>(۴ گرم در لیتر) | OG × AL     | ۱۷/۲۸ b                                   | ۰/۳۴۵ bc                                 | ۱/۱۸ a                                    |
|                                                |                               | RGS × SLM   | ۲۰/۴۴ ab                                  | ۰/۴۱۷ a                                  | ۱/۲۹ a                                    |
|                                                |                               | DALGAN      | ۲۰/۸۳ ab                                  | ۰/۴۰۸ ab                                 | ۱/۲۶ a                                    |
|                                                |                               | RGS 003     | ۲۱/۸۱ a                                   | ۰/۳۴۵ bc                                 | ۰/۹۹ b                                    |
|                                                |                               | RGS × OKAPI | ۲۰/۰۸ ab                                  | ۰/۲۹۳ c                                  | ۰/۸۸ b                                    |
|                                                | LSD (0.05)                    |             | ۳/۹۸                                      | ۰/۰۶۷                                    | ۰/۱۶                                      |

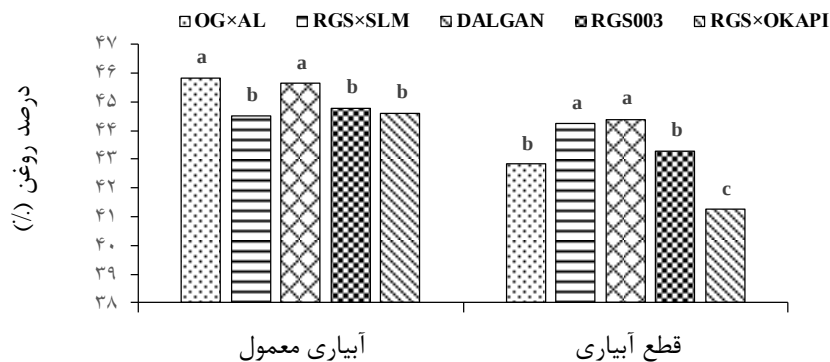
میانگین‌های هر ستون با حروف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار می‌باشند.

## ۴-۴-۶ درصد روغن دانه

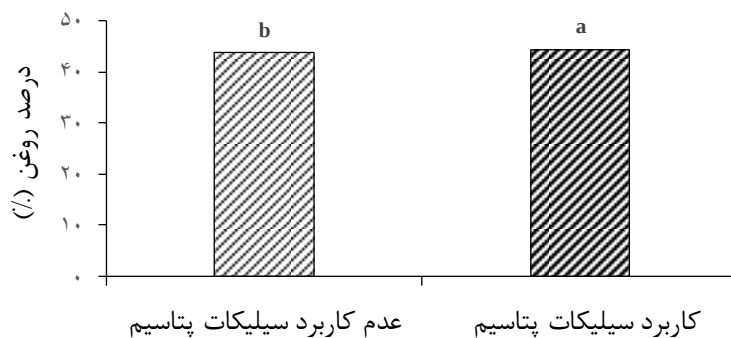
نتایج تجزیه مرکب داده‌ها نشان داد که اثرات ساده آبیاری، سیلیکات پتاسیم و ژنوتیپ و همچنین اثر متقابل آبیاری×ژنوتیپ بر درصد روغن معنی‌دار بود (جدول ۴-۱۴). در بین ژنوتیپ‌های مورد بررسی تفاوت معنی‌داری از نظر درصد روغن در سطوح آبیاری وجود داشت، به‌طوری‌که در شرایط آبیاری معمول، ژنوتیپ‌های OG×AL و DALGAN با میانگین ۴۵/۸۳ و ۴۵/۶۳ بیشترین و ژنوتیپ‌های RGS×SLM، RGS003 و RGS×OKAPI به ترتیب با میانگین ۴۴/۵۲، ۴۴/۷۹ و ۴۴/۶۱ کمترین درصد روغن را کسب کردند. در شرایط قطع آبیاری ژنوتیپ‌های RGS×SLM و DALGAN به ترتیب با میانگین ۴۴/۲۳ و ۴۴/۴۰ بیشترین و RGS×OKAPI با میانگین ۴۱/۲۴ کمترین درصد روغن را به خود اختصاص دادند (شکل ۴-۳۰). قطع آبیاری در ژنوتیپ‌های OG×AL، RGS×SLM، DALGAN و RGS003 به ترتیب منجر به کاهش ۶/۵، ۰/۷، ۲/۹۷ و ۳/۳۷ و ۷/۵ درصدی شد. تنش خشکی می‌تواند بر ترکیب روغن بذر تأثیر بگذارد و باعث کاهش درصد روغن شود که بر کیفیت و عملکرد روغن تأثیر منفی دارد (انجالبورت و همکاران، ۲۰۱۳؛ شیرانی‌راد و زندگی، ۲۰۱۲). کاهش درصد روغن در شرایط تنش می‌تواند به دلیل اکسیداسیون برخی از اسیدهای چرب غیر اشباع چندگانه و کم شدن قابلیت تبدیل هیدرات‌کربن به روغن رخ داده باشد (دانشمند و همکاران، ۱۳۸۷).

درصد روغن در شرایط عدم محلول‌پاشی ۴۳/۷۶ درصد بود که میزان آن در تیمار کاربرد سیلیکات پتاسیم به ۴۴/۴۵ درصد افزایش یافت (شکل ۴-۳۱). درصد روغن دانه صفتی با وراثت‌پذیری بالا می‌باشد که البته تا حدودی هم تحت تأثیر عوامل محیطی قرار می‌گیرد. در واقع قطع آبیاری با کاهش جذب و اختلال در فرایند کربن‌گیری موجب کاهش درصد روغن در بذر می‌شود. ترکیبات سیلیکاتی سبب پایداری چربی‌ها می‌گردد و از تخریب ساختمانی و عملکردی غشا سلولی جلوگیری

می‌کند (آگاهی و همکاران، ۱۹۹۸)، در نتیجه میزان چربی ذخیره شده در بافت ذخیره مانند دانه بیشتر می‌شود (حنیف و همکاران، ۲۰۱۷).



شکل ۴-۳۰- برهمکنش آبیاری × ژنوتیپ بر صفت درصد روغن به روش برش دهی. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.



شکل ۴-۳۱- مقایسه میانگین اثر سیلیکات پتاسیم بر صفت درصد روغن به روش برش دهی. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

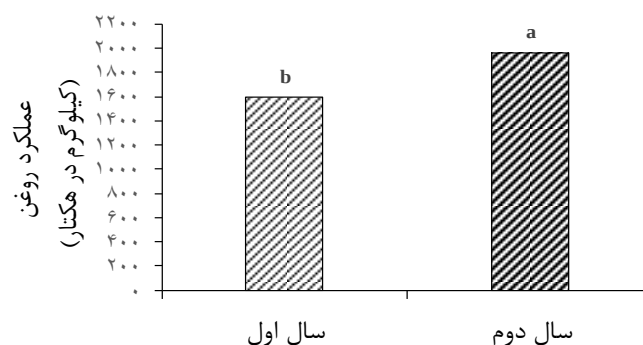
## ۴-۷ عملکرد روغن

بررسی تجزیه واریانس تأثیر تیمارهای آزمایش بر صفت عملکرد روغن دانه نشان داد که اثر تیمارهای سال، آبیاری، سیلیکات پتاسیم و ژنوتیپ و همچنین برهمکنش آبیاری × ژنوتیپ و آبیاری × سیلیکات پتاسیم × ژنوتیپ بر صفت عملکرد روغن دانه کلزا معنی‌دار بود (جدول ۴-۱۴). عملکرد روغن در سال اول ۱۵۹۵/۳۳ کیلوگرم در هکتار و سال دوم ۱۹۶۲/۹۳ کیلوگرم در هکتار بود. میزان بارندگی در سال دوم آزمایش افزایش یافت، این افزایش موجب بهبود رشد و فعالیت گیاه

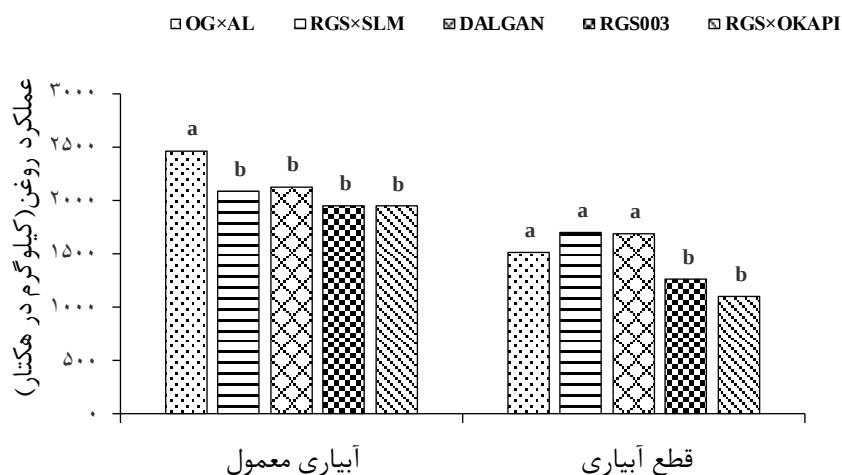
گردید، سال دوم نسبت به سال اول ۲۳ درصد عملکرد روغن بالاتری داشت، که نشان از تعدیل شرایط آزمایش در شرایط بارندگی بالا دارد (شکل ۴-۳۲). ژنوتیپ‌های کلزا در شرایط آبیاری معمول و قطع آبیاری عملکرد روغن متفاوتی داشتند، به طوری که در شرایط آبیاری معمول ژنوتیپ  $OG \times AL$  ( $2456/3$  کیلوگرم در هکتار) بیشترین و چهار ژنوتیپ دیگر کمترین عملکرد روغن را داشتند و از نظر آماری در یک سطح قرار داشتند (شکل ۴-۳۳). قطع آبیاری منجر به کاهش عملکرد روغن در ژنوتیپ‌های مورد بررسی شد، به طوری که در ژنوتیپ‌های  $OG \times AL$ ،  $RGS \times SLM$ ،  $DALGAN$ ،  $RGS003$  و  $RGS \times OKAPI$  به ترتیب منجر به کاهش  $38/43$ ،  $46/35$ ،  $65/20$ ،  $74/18$ ،  $62/38$ ، درصدی گردید (شکل ۴-۳۳). ژنوتیپ‌های مورد بررسی تفاوت معنی‌داری از نظر عملکرد روغن در تیمار محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم در دو سطح آبیاری داشتند. در شرایط آبیاری معمول، بالاترین عملکرد روغن، در هر دو شرایط محلول‌پاشی ( $2601$  کیلوگرم در هکتار) و بدون محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم ( $2311/5$  کیلوگرم در هکتار) به ژنوتیپ  $OG \times AL$  تعلق داشت، به طوری که محلول‌پاشی موجب  $11/13$  درصد افزایش عملکرد نسبت به تیمار شاهد (بدون محلول‌پاشی) شد (جدول ۴-۱۶). به علاوه در شرایط قطع آبیاری بدون محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم ژنوتیپ‌های  $RGS \times SLM$  و  $DALGAN$  به ترتیب با  $1541/7$  و  $1519/5$  کیلوگرم در هکتار و در تیمار سیلیکات‌پتاسیم ژنوتیپ‌های  $RGS \times SLM$  و  $DALGAN$  به ترتیب با  $1842$  و  $1845/8$  کیلوگرم در هکتار بالاترین عملکرد روغن را داشتند، به طوری که محلول‌پاشی ژنوتیپ‌های  $RGS \times SLM$  و  $DALGAN$  موجب  $19/47$  و  $21/47$  درصد افزایش عملکرد نسبت به تیمار شاهد (بدون محلول‌پاشی) شد (جدول ۴-۱۶).

تنش خشکی که در دوره‌های حساس تشکیل و پر شدن دانه رخ می‌دهد باعث کاهش کمیت و کیفیت روغن دانه می‌گردد (مالکی و همکاران، ۲۰۱۳) و همچنین محققین دریافتند که خشکی یکی از عوامل محدود کننده است که به طور قابل توجهی بر پارامترهای کیفیت کلزا تأثیر دارد (ال صباغ و

همکاران، ۲۰۱۶؛ ال صباغ و همکاران، ۲۰۱۵). شرایط کمبود آب به طور معنی داری بر میزان روغن و عملکرد روغن و همچنین عملکرد پروتئین بذر کلزا تأثیر می گذارد (ال صباغ و همکاران، ۲۰۱۹). تنش خشکی در مرحله زایشی کلزا منجر به کاهش ۶۹ درصدی عملکرد روغن دانه گردید (شهسواری، ۲۰۱۹). افزایش رطوبت قابل دسترس برای کلزا در طول دوره رشد زایشی منجر به افزایش عملکرد روغن دانه گردید (سیناکی و همکاران، ۲۰۰۷). ژنوتیپ های کلزا، عملکرد روغن متفاوتی دارند، به طوری که در بررسی ۶ ژنوتیپ کلزا، ژنوتیپ SW102 بالاترین عملکرد روغن (۱۷۰۳/۷۵ کیلوگرم در هکتار) را دارا بود (اقدام و همکاران، ۲۰۱۹). در تأیید اثرات مثبت ترکیبات حاوی سیلیکات بر درصد و عملکرد روغن در گیاهان روغنی، بیان شده است که جذب سیلیس توسط گیاه باعث افزایش آنزیم های  $ATPase$  و  $PPase$  در تونوپلاست می شود که این امر موجب کاهش جذب سدیم و افزایش مقادیر پتاسیم می گردد که در نهایت به جلوگیری از پراکسیداسیون چربی و افزایش درصد و عملکرد روغن می انجامد (لیانگ و همکاران، ۲۰۰۷).



شکل ۴-۳۲- مقایسه میانگین اثر سال بر عملکرد روغن روش برش دهی. میانگین های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی دار ندارند.

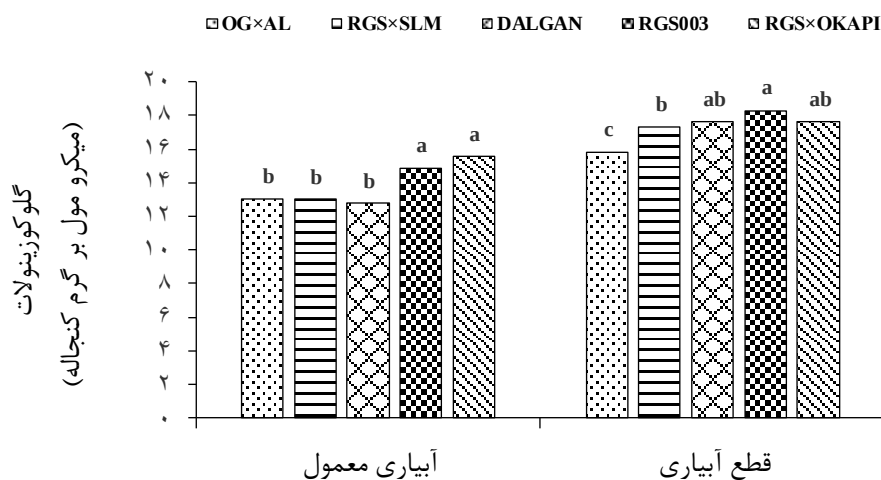


شکل ۴-۳۳- برهمکنش آبیاری × ژنوتیپ بر عملکرد روغن به روش برش‌دهی. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

#### ۴-۴-۸ میزان گلوکوزینولات دانه

نتایج تجربه واریانس صفات مورد بررسی نشان داد که اثرات ساده آبیاری، سیلیکات‌پتاسیم و ژنوتیپ و همچنین اثرات متقابل برهمکنش آبیاری × ژنوتیپ و آبیاری × سیلیکات‌پتاسیم × ژنوتیپ در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۴-۱۴). میزان گلوکوزینولات دانه در ژنوتیپ‌های کلزا در شرایط آبیاری معمول و قطع آبیاری متفاوت بود، به طوری که قطع آبیاری باعث افزایش میزان آن شد. در آبیاری معمول ژنوتیپ‌های RGS003 و RGS×OKAPI با میانگین ۱۴/۸۸ و ۱۵/۵۷ میکرومول بر گرم کنجاله بیشترین و سه ژنوتیپ دیگر کمترین میزان گلوکوزینولات را داشتند (شکل ۴-۳۴). در قطع آبیاری نیز ژنوتیپ RGS003 با میانگین ۱۸/۳۰ میکرومول بر گرم کنجاله بیشترین و ژنوتیپ OG×AL با ۱۵/۸۳ میکرومول بر گرم کنجاله کمترین میزان گلوکوزینولات را داشتند (شکل ۴-۳۴). نتایج نشان داد قطع آبیاری نسبت به آبیاری معمول به ترتیب منجر به افزایش ۲۱/۲۰، ۳۲/۹۴، ۳۷/۷۹، ۲۲/۹۸ و ۱۳/۲۹ درصدی گلوکوزینولات دانه در ژنوتیپ‌های OG×AL، RGS×SLM، DALGAN، RGS003 و RGS×OKAPI گردید، که نشان از واکنش متفاوت ارقام به تنش خشکی می‌باشد (شکل ۴-۳۴).

قطع آبیاری منجر به افزایش مقدار گلوکوزینولات در ژنوتیپ های مورد بررسی شد و همچنین کاربرد سیلیکات پتاسیم توانست تا حدودی مقدار گلوکوزینولات را کاهش دهد. به طوری که مقایسه میانگین ژنوتیپ ها در آبیاری معمول، عدم محلول پاشی نشان داد که ژنوتیپ های  $OG \times AL$ ،  $RGS \times SLM$  و DALGAN به ترتیب با میانگین  $13/22$ ،  $13/81$  و  $13/51$  میکرو مول بر گرم کنجاله، و در تیمار محلول پاشی سیلیکات پتاسیم ژنوتیپ های  $OG \times AL$ ،  $RGS \times SLM$  و DALGAN به ترتیب با میانگین  $12/89$ ،  $12/22$  و  $12/04$  میکرو مول بر گرم کنجاله، کمترین میزان گلوکوزینولات را به خود اختصاص دادند. در قطع آبیاری، بدون محلول پاشی نیز ژنوتیپ های  $OG \times AL$  و  $RGS \times SLM$  به ترتیب با میانگین  $16/89$  و  $17/28$  میکرو مول بر گرم کنجاله، و در تیمار محلول پاشی سیلیکات پتاسیم ژنوتیپ  $OG \times AL$  با میانگین  $14/77$  میکرو مول بر گرم کنجاله، کمترین میزان گلوکوزینولات را به خود اختصاص دادند (جدول ۴-۱۶). در هر دو شرایط کاربرد و عدم کاربرد سیلیکات پتاسیم و در هر دو سطح آبیاری، میزان گلوکوزینولات در سطح استاندارد و کمتر از حد  $30$  میکرومول بر گرم کنجاله بود. بیشترین تأثیر مثبت محلول پاشی سیلیکات پتاسیم در تیمار آبیاری در ژنوتیپ  $RGS \times SLM$  و در قطع آبیاری در ژنوتیپ  $OG \times AL$  به ترتیب با  $11/5$  و  $12$  درصد کاهش محتوای گلوکوزینولات دیده شد. تحقیقات دیگر نیز متفاوت بودن واکنش ارقام کلزا را به تنش خشکی در مرحله زایشی گزارش کرده اند (اقدام و همکاران، ۲۰۱۹). افزایش گلوکوزینولات موجب کاهش کیفیت و ارزش غذایی کنجاله ی کلزا شده که تحت تأثیر عوامل وراثتی و محیطی است (راتکه و همکاران، ۲۰۰۵). نتایج بررسی روحی و همکاران (۱۳۹۸) نشان داد تنش خشکی مقدار گلوکوزینولات دانه کلزا را نسبت به آبیاری کامل  $19/06$  درصد افزایش داد.



شکل ۴-۳۴-برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ بر گلوکوزینولات دانه به روش برش‌دهی. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

## ۴-۹-۴ ترکیب اسیدهای چرب

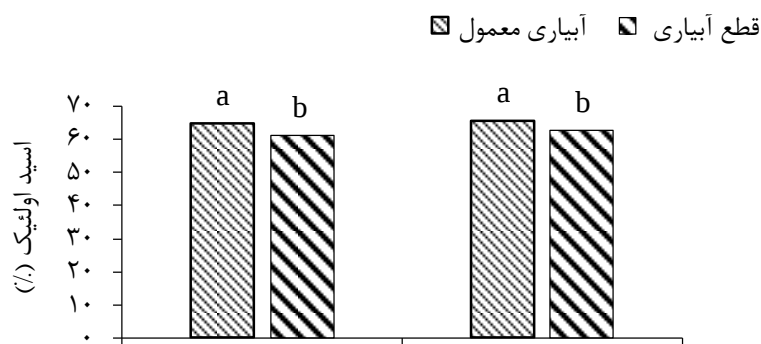
### ۴-۹-۴-۱ اولئیک اسید

بر اساس نتایج تجزیه مرکب انجام شده مشخص گردید که اثر ساده سال، آبیاری، سیلیکات‌پتاسیم و ژنوتیپ و همچنین اثرات متقابل سال×آبیاری، آبیاری×ژنوتیپ و آبیاری×سیلیکات‌پتاسیم و همچنین اثر متقابل برهمکنش آبیاری×سیلیکات‌پتاسیم×ژنوتیپ بر اولئیک اسید معنی‌دار بود (جدول ۴-۱۴). مقایسه میانگین برهمکنش سال×آبیاری نشان داد در هر دو سال زراعی، قطع آبیاری منجر به کاهش درصد اولئیک اسید شد. در سال اول، اولئیک اسید ۶۵ درصد بود که قطع آبیاری منجر به کاهش ۵/۶ درصدی اولئیک اسید و در سال دوم، اولئیک اسید ۶۵/۸۲ درصد بود که قطع آبیاری منجر به کاهش ۴/۵ درصدی آن گردید (شکل ۴-۳۵). مقایسه میانگین برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ نشان داد که واکنش ژنوتیپ‌ها در شرایط آبیاری و قطع آبیاری در درصد اولئیک اسید متفاوت بود. در آبیاری معمول، ژنوتیپ OG×AL (۶۶/۷۸ درصد) بیشترین و ژنوتیپ DALGAN (۶۴/۲۶ درصد) کمترین درصد اولئیک اسید را داشتند. در قطع آبیاری ژنوتیپ‌های RGS×SLM و DALGAN با میانگین

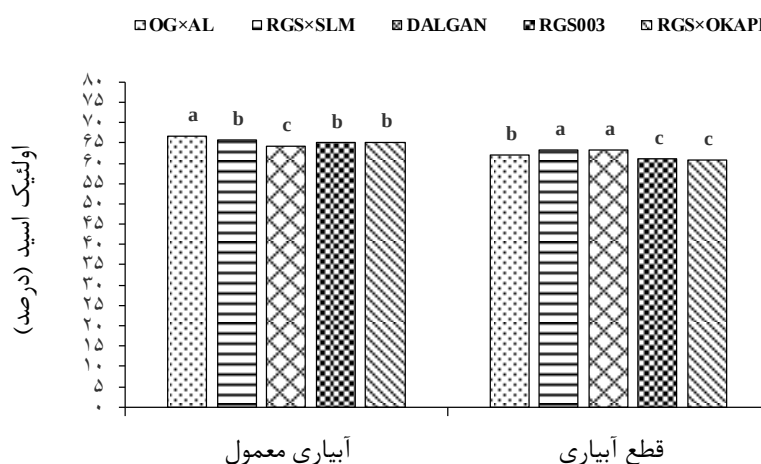
۶۳/۳۴ و ۶۳/۱۸ بیشترین و ژنوتیپ‌های RGS003 و RGS×OKAPI با میانگین ۶۰/۹۶ و ۶۰/۸۷ کمترین درصد اولئیک اسید را داشتند. نتایج نشان داد، قطع آبیاری نسبت به شاهد (آبیاری معمول) به ترتیب منجر به کاهش ۷، ۳/۵، ۱/۶، ۶/۳ و ۶/۷ درصدی اولئیک اسید در ژنوتیپ‌های OG×AL، RGS×SLM، DALGAN، RGS003 و RGS×OKAPI گردید، که نشان از واکنش متفاوت ارقام به تنش خشکی داشت (شکل ۴-۳۶). مقایسه میانگین برهمکنش آبیاری×سیلیکات‌پتاسیم نشان داد که در آبیاری معمول، درصد اولئیک اسید با محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم ۶۶/۱۴ درصد شد که نسبت به شاهد (عدم محلول‌پاشی) ۲/۱۹ درصد افزایش داشت. در قطع آبیاری، درصد اولئیک اسید در دو سطح محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم تفاوت معنی‌داری نسبت به یکدیگر نداشتند (شکل ۴-۳۷). بررسی برهمکنش آبیاری×سیلیکات‌پتاسیم×ژنوتیپ نیز نشان داد که ژنوتیپ OG×AL در شرایط آبیاری معمول، بدون محلول‌پاشی با میانگین ۶۵/۳۹ درصد بیشترین و ژنوتیپ‌های DALGAN و RGS×OKAPI به‌ترتیب با میانگین ۶۴/۱۸ و ۶۴/۳۱ درصد کمترین میزان اسید را به خود اختصاص دادند. در شرایط آبیاری معمول، در محلول‌پاشی ژنوتیپ OG×AL با میانگین ۶۸/۱۶ درصد بیشترین و ژنوتیپ DALGAN با میانگین ۶۴/۳۵ درصد کمترین میزان اولئیک اسید را به خود اختصاص دادند. در قطع آبیاری، عدم محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم ژنوتیپ‌های RGS×SLM و DALGAN به ترتیب با میانگین ۶۳/۰۹ و ۶۲/۳۹ درصد بالاترین میزان اولئیک اسید را داشتند و ژنوتیپ RGS×OKAPI با میانگین ۶۰/۶۱ کمترین درصد اولئیک اسید را داشتند. در شرایط قطع آبیاری به همراه محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم نیز ژنوتیپ‌های RGS×SLM و DALGAN به ترتیب با میانگین ۶۳/۵۸ و ۶۳/۹۷ درصد بیشترین و سه ژنوتیپ دیگر کمترین درصد میزان اولئیک اسید را به خود اختصاص دادند و در یک گروه آماری قرار گرفتند (جدول ۴-۱۶).

محققین گزارش کردند که تنش خشکی باعث کاهش اولئیک اسید در کلزا شد (فراهانی و همکاران، ۲۰۱۹؛ هاتزیگ و همکاران، ۲۰۱۸). آنها اذعان داشتند که بیشترین میزان اسید اولئیک در

تیمار آبیاری معمول با میانگین ۶۳/۹ بود و محدودیت آبیاری بعد از گلدهی و خورجین‌دهی باعث کاهش این اسید چرب با میانگین ۶۲/۶ و ۶۱/۱ درصد شد. ترکیبات حاوی سیلیکون در شرایط تنش بر روی گیاه جو (*Hordeum vulgare* L.) توانست درصد اولئیک اسید را نسبت به عدم حضور آن افزایش دهد (لیانگ و همکاران، ۲۰۰۵). میانگین درصد اولئیک اسید در روغن دانه ارقام کلزا را بین ۵۷ تا ۶۲ درصد گزارش کرده‌اند و افزایش درصد اولئیک اسید در پروفیل اسیدهای چرب روغن دانه کلزا را در ارتباط با افزایش میزان بارندگی و پائین بودن میانگین درجه حرارت در طول دوره رشد گیاه دانسته‌اند، به عبارتی تنش خشکی می‌تواند باعث کاهش مقدار اسید اولئیک دانه گردد (جباری و همکاران، ۱۳۹۷).

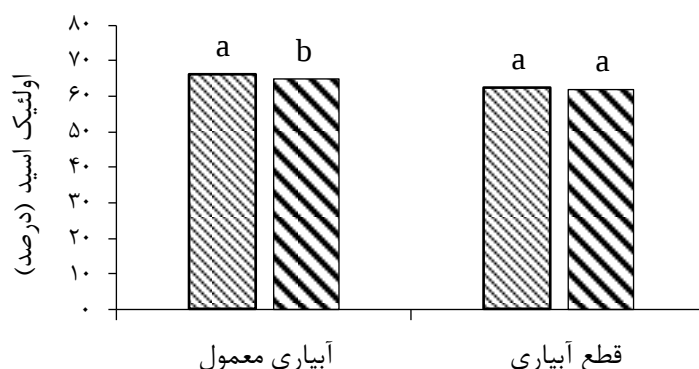


شکل ۴-۳۵- برهمکنش سال در آبیاری دومیزان اسید اولئیک به روش‌های آبیاری. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.



شکل ۴-۳۶- برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ بر درصد اولئیک اسید به روش آبیاری. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

عدم محلول پاشی □ محلول پاشی ■



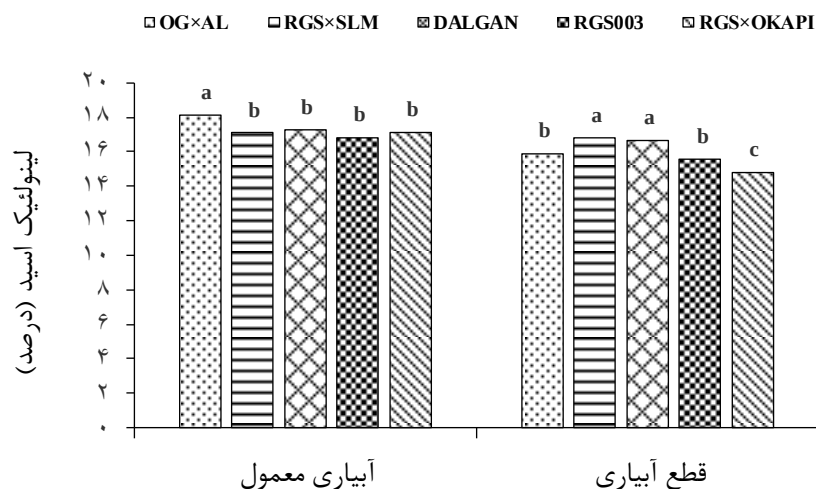
شکل ۴-۳۷- برهمکنش آبیاری×سیلیکات پتاسیم بر درصد اولئیک اسید در سال زراعی دوم (۹۶-۹۷) به روش برش دهی. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

#### ۴-۹-۲-۴-۴ لینولئیک اسید

بر اساس نتایج تجزیه مرکب انجام شده مشخص گردید که اثر ساده آبیاری، سیلیکات پتاسیم و ژنوتیپ و همچنین اثرات متقابل آبیاری×ژنوتیپ و آبیاری×سیلیکات پتاسیم×ژنوتیپ بر لینولئیک اسید معنی‌دار بود (جدول ۴-۱۴). مقایسه میانگین برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ نشان داد که واکنش ژنوتیپ‌ها در شرایط آبیاری و قطع آبیاری بر درصد لینولئیک اسید متفاوت بود. در آبیاری معمول، ژنوتیپ OG×AL (۱۸/۱۳ درصد) بیشترین و چهار ژنوتیپ دیگر کمترین درصد اولئیک اسید را داشتند و در یک گروه آماری قرار گرفتند. در قطع آبیاری ژنوتیپ‌های RGS×SLM و DALGAN با میانگین ۱۶/۷۹ و ۱۶/۶۶ بیشترین و ژنوتیپ RGS×OKAPI با میانگین ۱۴/۸۱ کمترین درصد لینولئیک اسید را داشتند. نتایج نشان داد قطع آبیاری نسبت به شاهد (آبیاری معمول) به ترتیب منجر به کاهش ۱۲/۲۴، ۱/۸، ۳/۴، ۷/۳ و ۱۳/۶۴ درصدی لینولئیک اسید در ژنوتیپ‌های OG×AL، RGS×SLM، DALGAN، RGS003 و RGS×OKAPI گردید، که نشان از واکنش متفاوت ارقام به تنش خشکی داشت (شکل ۴-۳۸). بررسی برهمکنش آبیاری×سیلیکات پتاسیم×ژنوتیپ همچنین نشان داد تفاوت معنی‌داری بین واکنش ژنوتیپ‌ها با کاربرد و عدم کاربرد سیلیکات پتاسیم در سطوح

مختلف آبیاری بر این صفت مشاهده شد (جدول ۴-۱۶). در این آزمایش اعمال تنش خشکی منجر به کاهش درصد لینولئیک اسید همانند اولئیک اسید گردید و محلول پاشی سیلیکات پتاسیم توانست درصد لینولئیک اسید را در مقایسه با عدم کاربرد سیلیکات پتاسیم تا حدودی افزایش دهد. در آبیاری معمول، بدون محلول پاشی سیلیکات پتاسیم ژنوتیپ OG×AL با میانگین ۱۷/۶۰ بالاترین و ژنوتیپ RGS×OKAPI با میانگین ۱۶/۴۹ کمترین درصد لینولئیک اسید را به خود اختصاص دادند و در محلول پاشی سیلیکات پتاسیم بالاترین میزان لینولئیک اسید به ژنوتیپ OG×AL با میانگین ۱۸/۶۷ درصد و کمترین به RGS×SLM با میانگین ۱۶/۹۲ تعلق گرفت. در قطع آبیاری، بدون محلول پاشی سیلیکات پتاسیم ژنوتیپ های OG×AL، RGS×SLM و DALGAN نیز به ترتیب با میانگین ۱۶/۲۵، ۱۶/۱۰ و ۱۵/۹۵ درصد بالاترین میزان لینولئیک اسید را داشتند، که در یک گروه آماری قرار گرفتند و در محلول پاشی سیلیکات پتاسیم نیز ژنوتیپ های RGS×SLM و DALGAN با میانگین ۱۷/۴۷ و ۱۷/۳۸ درصد بالاترین میزان لینولئیک اسید را به خود اختصاص دادند (جدول ۴-۱۶). به طور کلی محلول پاشی سیلیکات پتاسیم در هر دو شرایط آبیاری، موجب بهبود درصد لینولئیک اسید در برخی ژنوتیپ های مورد بررسی گردید، این بهبود می تواند به دلیل افزایش فتوسنتز، فعالیت بهتر آنزیم ها و متابولیسم های سلولی باشد.

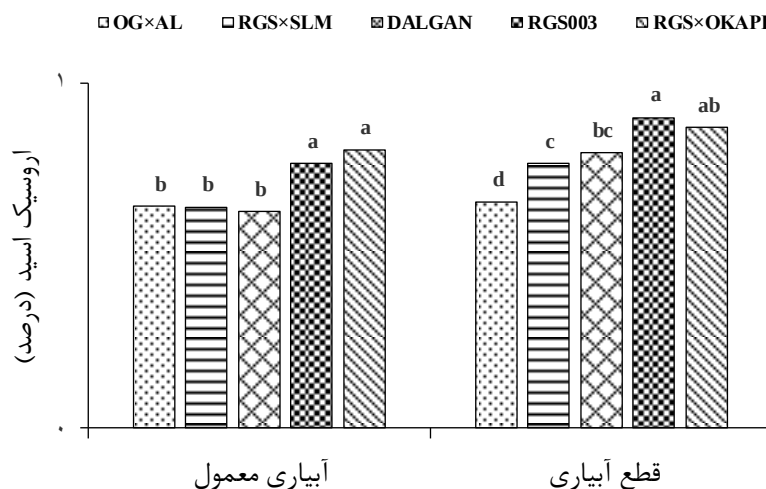
ترکیبات حاوی سیلیکون در شرایط تنش بر روی گیاه جو (*Hordeum vulgare* L.) توانست درصد لینولئیک اسید را در مقایسه با عدم کاربرد آن کاهش دهد (لیانگ و همکاران، ۲۰۰۵)، که با نتایج این آزمایش مطابقت داشت. توحیدی مقدم و همکاران (۲۰۱۱) گزارش کردند که تنش خشکی باعث کاهش محتوای روغن کلزا و اسید لینولئیک شد، اما محتوای اسیدهای استئاریک، آلفا-لینولنیک و گادولئیک را افزایش داد. محققان گزارش کردند که تنش خشکی درصد لینولئیک اسید را کاهش داد (اولا و همکاران، ۲۰۱۲).



شکل ۴-۳۸- برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ بر درصد لینولئیک اسید به روش برش‌دهی. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

#### ۴-۹-۳ اروسیک اسید

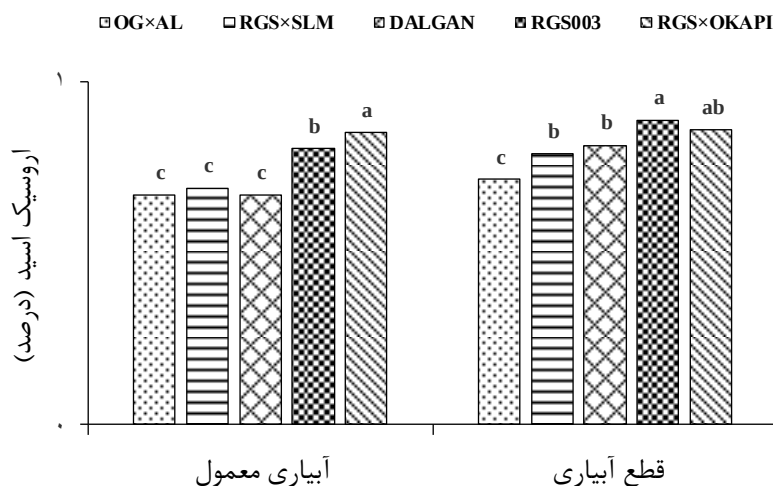
با توجه به نتایج آزمون بارتلت این صفت به صورت جداگانه در دو سال زراعی ۹۵-۹۶ و ۹۶-۹۷ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تجربه واریانس صفت مورد بررسی نشان داد که اثرات ساده آبیاری، سیلیکات‌پتاسیم و ژنوتیپ و همچنین اثرات متقابل آبیاری×ژنوتیپ و آبیاری×سیلیکات پتاسیم×ژنوتیپ در هر دو سال زراعی بر درصد اروسیک اسید معنی‌دار بود (جدول ۴-۱۵). برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ در سال زراعی اول نشان داد که قطع آبیاری موجب افزایش اروسیک اسید در ژنوتیپ‌های مورد بررسی گردید، به‌طوری‌که در آبیاری معمول، ژنوتیپ‌های RGS003 و RGS×OKAPI به ترتیب با میانگین ۰/۳۸ و ۰/۴۰ بیشترین درصد اروسیک اسید را داشتند و در قطع آبیاری نیز ژنوتیپ RGS003 با ۰/۴۵ درصد بیشترین اروسیک اسید را داشت. در سال زراعی اول، قطع آبیاری بیشترین تأثیر را بر ژنوتیپ DALGAN داشت که باعث افزایش ۲۷/۱۵ درصدی اروسیک اسید نسبت به شاهد (آبیاری معمول) شد، که نشان از واکنش متفاوت این ژنوتیپ به تنش خشکی بود (شکل ۴-۳۹).



شکل ۴-۳۹-برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ بر درصد اروسیک اسید در سال زراعی اول (۹۶-۹۵) به روش برش‌دهی. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ در سال زراعی دوم نیز نشان داد که قطع آبیاری موجب افزایش اروسیک اسید در ژنوتیپ‌های مورد بررسی گردید، به‌طوری‌که در آبیاری معمول، ژنوتیپ RGS×OKAPI با میانگین ۰/۴۳ بیشترین درصد اروسیک اسید را داشت و در قطع آبیاری نیز ژنوتیپ RGS003 با ۰/۴۴ درصد بیشترین اروسیک اسید را داشت. در سال زراعی دوم نیز مانند سال زراعی اول، قطع آبیاری در ژنوتیپ DALGAN با ۲۱/۴۲ درصد افزایش اروسیک اسید نسبت به شاهد (آبیاری معمول) بیشترین تأثیر را نسبت به ژنوتیپ‌های دیگر نشان داد (شکل ۴-۴۰). بررسی برهمکنش آبیاری×سیلیکات‌پتاسیم×ژنوتیپ در سال زراعی اول نشان داد که در آبیاری معمول، بدون محلول‌پاشی ژنوتیپ‌های RGS×OKAPI و RGS003 به ترتیب با میانگین ۰/۴۴ و ۰/۴۲ درصد بیشترین و سه ژنوتیپ دیگر کمترین درصد اروسیک اسید را به خود اختصاص دادند و در یک گروه آماری قرار داشتند. در آبیاری معمول به همراه محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم ژنوتیپ‌های RGS×OKAPI و RGS003 به ترتیب با میانگین ۰/۴۲ و ۰/۳۸ درصد بیشترین و سه ژنوتیپ دیگر با

کمترین درصد اروسیک اسید در یک گروه آماری قرار داشتند. در قطع آبیاری و عدم محلول‌پاشی، ژنوتیپ‌های RGS003 و RGS×OKAPI هر دو با میانگین ۰/۴۶ درصد بیشترین و سه ژنوتیپ دیگر کمترین درصد اروسیک اسید را به خود اختصاص دادند. در قطع آبیاری با محلول‌پاشی، ژنوتیپ RGS003 با میانگین ۰/۴۳ درصد بیشترین و ژنوتیپ OG×AL با میانگین ۰/۳۳ کمترین درصد اروسیک اسید را داشتند (جدول ۴-۱۷). نتایج سال دوم نشان داد در آبیاری معمول، بدون محلول‌پاشی ژنوتیپ‌های RGS003 و RGS×OKAPI به ترتیب با میانگین ۰/۴۱ و ۰/۴۰ درصد بیشترین و سه ژنوتیپ دیگر کمترین درصد اروسیک اسید را به خود اختصاص دادند. در آبیاری معمول به همراه محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم ژنوتیپ RGS×OKAPI با میانگین ۰/۳۹ درصد بیشترین و ژنوتیپ‌های RGS×SLM و DALGAN با میانگین ۰/۲۹ درصد کمترین میزان اروسیک اسید را داشتند. در قطع آبیاری بدون محلول‌پاشی، ژنوتیپ‌های RGS003 و RGS×OKAPI به ترتیب با میانگین ۰/۴۶ و ۰/۴۷ درصد بیشترین و سه ژنوتیپ دیگر کمترین درصد اروسیک اسید را به خود اختصاص دادند. در قطع آبیاری با محلول‌پاشی، ژنوتیپ‌های RGS003 و RGS×OKAPI به ترتیب با میانگین ۰/۴۴ و ۰/۳۹ درصد بیشترین و ژنوتیپ OG×AL با میانگین ۰/۲۹ کمترین درصد اروسیک اسید را داشتند (جدول ۴-۱۷).



شکل ۴-۴۰- برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ بر درصد اروسیک اسید در سال زراعی دوم (۹۶-۹۷) به روش برش‌دهی. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

در هر دو سال آزمایش، تنش خشکی مقدار اروسیک اسید را در ژنوتیپ‌های مورد مطالعه نسبت به عدم تنش افزایش داد و کاربرد سیلیکات پتاسیم توانست در هر دو سطح آبیاری درصد اروسیک اسید را کاهش دهد، که نشان از تأثیر منفی تنش خشکی و مثبت محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم بر کیفیت روغن کلزا دارد، چرا که اروسیک اسید برای انسان مضر است و مقادیر بالاتر از ۲ درصد اروسیک اسید از نظر تغذیه‌ای مطلوب نیست (کانسکن و همکاران، ۲۰۱۹). تحقیقات نشان داد که تنش خشکی درصد اروسیک اسید کلزا را افزایش داد (اولا و همکاران، ۲۰۱۲؛ علی و همکاران، ۲۰۱۴). ترکیبات سیلیکاتی باعث ثبات چربی‌ها در غشاء سلولی در شرایط تنش خشکی می‌گردد و قادر است از زوال ساختاری و عملکردی غشای سلولی در این شرایط ممانعت نماید (آگاری و همکاران، ۱۹۹۸). وانگ و گالتا (۱۹۹۸) دریافتند که محلول‌پاشی سیلیکات باعث افزایش نسبت اسیدهای چرب اشباع در گلیکولیپیدها و فسفولیپیدها شد و همچنین منجر به افزایش مقدار لیپیدهای غشایی گردید. بر اساس تحقیقات گذشته (لیانگ و همکاران، ۲۰۰۵؛ لیانگ و همکاران، ۲۰۰۳) و نتایج حاضر، به نظر می‌رسد که ممکن است ترکیبات سیلیکاتی نقش مهمی در حفظ یکپارچگی و ثبات غشاء در شرایط تنش خشکی داشته باشد.

جدول ۴-۱۴- نتایج تجزیه مرکب برخی صفات بیوشیمیایی کلزا

| منابع تغییرات                          | درجه آزادی | عملکرد روغن            | درصد روغن دانه       | گلوکوزینولات دانه   | اولئیک اسید          | لینولئیک اسید       |
|----------------------------------------|------------|------------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| سال                                    | ۱          | ۴۰۵۳۸۹۲/۸۰**           | ۵/۷۸ <sup>ns</sup>   | ۲/۰۹ <sup>ns</sup>  | ۴۰/۸۳**              | ۷/۶۵ <sup>ns</sup>  |
| سال (تکرار)                            | ۴          | ۸۵۲۲۹/۶۷               | ۲/۲۳                 | ۸/۷۳                | ۰/۹۷                 | ۱/۱۸                |
| آبیاری                                 | ۱          | ۱۳۱۵۳۹۴۰/۸۳**          | ۵۳/۱۰**              | ۳۶۲/۴۱**            | ۳۳۳/۲۶**             | ۵۴/۱۹**             |
| سال × آبیاری                           | ۱          | ۵۸۵۲۰/۸۳ <sup>ns</sup> | ۰/۱ <sup>ns</sup>    | ۰/۴۶ <sup>ns</sup>  | ۳/۶۱*                | ۰/۹۹ <sup>ns</sup>  |
| سیلیکات پتاسیم                         | ۱          | ۹۵۱۹۴۴/۵۳**            | ۱۳/۹۴*               | ۲۴/۸۳**             | ۲۹/۹۸**              | ۳/۳۸**              |
| سال × سیلیکات پتاسیم                   | ۱          | ۸۱۱/۲۰ <sup>ns</sup>   | ۰/۰۴ <sup>ns</sup>   | ۰/۱۱ <sup>ns</sup>  | ۰/۴۰ <sup>ns</sup>   | ۰/۲۹ <sup>ns</sup>  |
| آبیاری × سیلیکات پتاسیم                | ۱          | ۴۷۲/۰۳ <sup>ns</sup>   | ۰/۵۶ <sup>ns</sup>   | ۰/۰۵ <sup>ns</sup>  | ۵/۸۹*                | ۰/۱۴ <sup>ns</sup>  |
| سال × آبیاری × سیلیکات پتاسیم          | ۱          | ۱۷/۶۳ <sup>ns</sup>    | ۰/۰۰۰۸ <sup>ns</sup> | ۰/۰۳ <sup>ns</sup>  | ۰/۰۰۱۳ <sup>ns</sup> | ۰/۰۱۱ <sup>ns</sup> |
| خطای (الف)                             | ۱۲         | ۵۵۳۶۱/۱۴               | ۱/۹۴                 | ۱/۴۳                | ۰/۷۵                 | ۰/۲۸                |
| ژنوتیپ                                 | ۴          | ۹۹۰۶۷۸/۶۱**            | ۱۲/۶۶**              | ۲۲/۰۷**             | ۱۱/۹۸**              | ۵/۶۹**              |
| سال × ژنوتیپ                           | ۴          | ۱۴۴۱/۲۸ <sup>ns</sup>  | ۰/۰۰۷ <sup>ns</sup>  | ۰/۰۲ <sup>ns</sup>  | ۱/۴۳ <sup>ns</sup>   | ۰/۳۶ <sup>ns</sup>  |
| آبیاری × ژنوتیپ                        | ۴          | ۳۵۹۳۵۷/۸۱**            | ۲۲/۱۴**              | ۷/۴۸**              | ۱۴/۶۲**              | ۵/۰۸**              |
| سال × آبیاری × ژنوتیپ                  | ۴          | ۱۰۳۶/۴۰ <sup>ns</sup>  | ۰/۰۲۱ <sup>ns</sup>  | ۰/۱۲ <sup>ns</sup>  | ۰/۸۰ <sup>ns</sup>   | ۰/۰۳ <sup>ns</sup>  |
| سیلیکات پتاسیم × ژنوتیپ                | ۴          | ۴۳۱۲/۶۴ <sup>ns</sup>  | ۳/۷۵ <sup>ns</sup>   | ۰/۳۷ <sup>ns</sup>  | ۰/۲۷ <sup>ns</sup>   | ۰/۱۹ <sup>ns</sup>  |
| سال × سیلیکات پتاسیم × ژنوتیپ          | ۴          | ۶۶۱/۱۴ <sup>ns</sup>   | ۰/۰۵ <sup>ns</sup>   | ۰/۰۰۱ <sup>ns</sup> | ۰/۷۰ <sup>ns</sup>   | ۰/۰۰۳ <sup>ns</sup> |
| آبیاری × سیلیکات پتاسیم × ژنوتیپ       | ۴          | ۸۵۴۱۵/۹۷*              | ۰/۹۳ <sup>ns</sup>   | ۴/۹۹**              | ۳/۸۱**               | ۵/۶۳**              |
| سال × آبیاری × سیلیکات پتاسیم × ژنوتیپ | ۴          | ۲۶۷/۶۵ <sup>ns</sup>   | ۰/۰۵ <sup>ns</sup>   | ۰/۰۰۳ <sup>ns</sup> | ۰/۷۵ <sup>ns</sup>   | ۰/۰۰۲ <sup>ns</sup> |
| خطای (ب)                               | ۶۴         | ۳۰۲۷۷/۴۰               | ۱/۸۶                 | ۰/۶۵                | ۰/۷۲                 | ۰/۲۰۳               |
| ضریب تغییرات (%)                       |            | ۹/۷۸                   | ۳/۰۹                 | ۵/۱۸                | ۱/۳۱                 | ۲/۷۱                |

\*، \*\* و ns به ترتیب معنی داری در سطوح احتمال پنج و یک درصد و عدم معنی دار.

جدول ۴-۱۵- تجزیه واریانس درصد اروسیک اسید کلزا تحت تأثیر آبیاری، سیلیکات پتاسیم و ژنوتیپ در دو سال زراعی

| میانگین مربعات        |            |                                  |
|-----------------------|------------|----------------------------------|
| سال اول زراعی (۹۵-۹۶) |            | منابع تغییرات                    |
| اروسیک اسید           | درجه آزادی |                                  |
| ۰/۰۰۵ <sup>ns</sup>   | ۲          | بلوک                             |
| ۰/۰۳***               | ۱          | آبیاری                           |
| ۰/۰۲۱***              | ۱          | سیلیکات پتاسیم                   |
| ۰/۰۰۰۶ <sup>ns</sup>  | ۱          | آبیاری × سیلیکات پتاسیم          |
| ۰/۰۰۱۵                | ۶          | خطای (الف)                       |
| ۰/۰۲۱***              | ۴          | ژنوتیپ                           |
| ۰/۰۰۳*                | ۴          | آبیاری × ژنوتیپ                  |
| ۰/۰۰۰۳ <sup>ns</sup>  | ۴          | سیلیکات پتاسیم × ژنوتیپ          |
| ۰/۰۰۲*                | ۴          | آبیاری × سیلیکات پتاسیم × ژنوتیپ |
| ۰/۰۰۰۸                | ۳۲         | خطای دوم                         |
| ۷/۸                   |            | ضریب تغییرات (/.)                |
| سال دوم زراعی (۹۶-۹۷) |            |                                  |
| اروسیک اسید           | درجه آزادی | منابع تغییرات                    |
| ۰/۰۰۶ <sup>ns</sup>   | ۲          | بلوک                             |
| ۰/۰۱۹*                | ۱          | آبیاری                           |
| ۰/۰۱۵*                | ۱          | سیلیکات پتاسیم                   |
| ۰/۰۰۰۰۶ <sup>ns</sup> | ۱          | آبیاری × سیلیکات پتاسیم          |
| ۰/۰۰۱                 | ۶          | خطای (الف)                       |
| ۰/۰۱۵***              | ۴          | ژنوتیپ                           |
| ۰/۰۰۲***              | ۴          | آبیاری × ژنوتیپ                  |
| ۰/۰۰۰۲ <sup>ns</sup>  | ۴          | سیلیکات پتاسیم × ژنوتیپ          |
| ۰/۰۰۱۳*               | ۴          | آبیاری × سیلیکات پتاسیم × ژنوتیپ |
| ۰/۰۰۳۳                | ۳۲         | خطای دوم                         |
| ۴/۰۱                  |            | ضریب تغییرات (/.)                |

\*, \*\* و ns به ترتیب معنی داری در سطوح احتمال پنج و یک درصد و عدم معنی دار.

جدول ۴-۱۶- مقایسه میانگین برهمکنش سه گانه آبیاری × سیلیکات پتاسیم × ژنوتیپ بر صفات مورد بررسی در ژنوتیپ‌های کلزا به‌روش برش‌دهی

| آبیاری                     | محلول پاشی سیلیکات پتاسیم     | ژنوتیپ      | عملکرد روغن<br>(کیلوگرم در هکتار) | گلوکوزینولات<br>(میکرومول بر گرم کنجاله) | اولئیک اسید<br>(درصد) | لینولئیک اسید<br>(درصد) |
|----------------------------|-------------------------------|-------------|-----------------------------------|------------------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| شاهد                       | عدم محلول پاشی                | OG × AL     | ۲۳۱۱/۵ a                          | ۱۳/۲۲ b                                  | ۶۵/۳۹ a               | ۱۷/۶۰ a                 |
|                            |                               | RGS × SLM   | ۲۰۴۰/۵ ab                         | ۱۳/۸۱ b                                  | ۶۵/۱۴ ab              | ۱۷/۳۰ ab                |
|                            |                               | DALGAN      | ۲۰۹۶ ab                           | ۱۳/۵۱ b                                  | ۶۴/۱۸ b               | ۱۷/۴۴ ab                |
|                            |                               | RGS 003     | ۱۸۸۴/۳ b                          | ۱۵/۳۴ a                                  | ۶۴/۴۴ ab              | ۱۶/۶۷ bc                |
|                            |                               | RGS × OKAPI | ۱۷۸۳/۳ b                          | ۱۵/۵۹ a                                  | ۶۴/۳۱ b               | ۱۶/۴۹ c                 |
| شاهد                       | محلول پاشی<br>(۴ گرم در لیتر) | LSD (0.05)  | ۳۴۱/۷۵                            | ۱/۲۹                                     | ۱/۱۰                  | ۰/۷۸                    |
|                            |                               | OG × AL     | ۲۶۰۱ a                            | ۱۲/۸۹ c                                  | ۶۸/۱۶ a               | ۱۸/۶۸ a                 |
|                            |                               | RGS × SLM   | ۲۱۲۳/۷ b                          | ۱۲/۲۲ c                                  | ۶۶/۲۰ b               | ۱۶/۹۲ c                 |
|                            |                               | DALGAN      | ۲۱۴۵/۳ b                          | ۱۲/۰۴ c                                  | ۶۴/۳۵ c               | ۱۷/۰۸ bc                |
|                            |                               | RGS 003     | ۲۰۱۶/۷ b                          | ۱۴/۴۳ b                                  | ۶۵/۷۸ b               | ۱۷/۰۲ bc                |
| شاهد                       | عدم محلول پاشی                | RGS × OKAPI | ۲۰۹۹/۸ b                          | ۱۵/۵۵ a                                  | ۶۶/۱۹ b               | ۱۷/۸۲ b                 |
|                            |                               | LSD (0.05)  | ۳۶۰/۳۱                            | ۰/۹۷                                     | ۱/۱۰                  | ۰/۸۲                    |
|                            |                               | OG × AL     | ۱۴۷۶/۸ ab                         | ۱۶/۸۹ b                                  | ۶۲/۱۸ ab              | ۱۶/۲۶ a                 |
|                            |                               | RGS × SLM   | ۱۵۴۱/۷ a                          | ۱۷/۲۸ b                                  | ۶۳/۰۹ a               | ۱۶/۱۰ a                 |
|                            |                               | DALGAN      | ۱۵۱۹/۵ a                          | ۱۷/۵۳ bc                                 | ۶۲/۳۹ a               | ۱۵/۹۵ a                 |
| مرحله خورجین<br>دهی به بعد | عدم محلول پاشی                | RGS 003     | ۱۱۹۱/۷ bc                         | ۱۸/۶۱ a                                  | ۶۰/۷۴ bc              | ۱۵/۴۶ b                 |
|                            |                               | RGS × OKAPI | ۱۰۵۵/۳ c                          | ۱۸/۷۴ a                                  | ۶۰/۶۱ c               | ۱۵/۳۴ b                 |
|                            |                               | LSD (0.05)  | ۲۸۷/۲۱                            | ۱/۲۱                                     | ۱/۵۵                  | ۰/۴۸                    |
|                            |                               | OG × AL     | ۱۵۳۸/۳ b                          | ۱۴/۷۷ c                                  | ۶۱/۹۴ b               | ۱۵/۵۷ b                 |
|                            |                               | RGS × SLM   | ۱۸۴۲ a                            | ۱۵/۳۳ ab                                 | ۶۳/۵۸ a               | ۱۷/۴۸ a                 |
| مرحله خورجین<br>دهی به بعد | محلول پاشی<br>(۴ گرم در لیتر) | DALGAN      | ۱۸۴۵/۸ a                          | ۱۷/۶۹ ab                                 | ۶۳/۹۷ a               | ۱۷/۳۸ a                 |
|                            |                               | RGS 003     | ۱۳۲۶ bc                           | ۱۷/۹۸ a                                  | ۶۱/۱۹ b               | ۱۵/۷۵ b                 |
|                            |                               | RGS × OKAPI | ۱۱۴۳/۳ c                          | ۱۶/۵۳ b                                  | ۶۱/۱۲ b               | ۱۴/۲۸ c                 |
|                            |                               | LSD (0.05)  | ۲۸۳/۳۷                            | ۱/۲۶                                     | ۱/۴۶                  | ۰/۵۲                    |

میانگین‌های هر ستون با حروف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار می‌باشند.

جدول ۴-۱۷- مقایسه میانگین درصد اروسیک اسید کلزا تحت تأثیر آبیاری، محلول پاشی و ژنوتیپ در دو سال زراعی

| آبیاری                           | محلول پاشی<br>سیلیکات پتاسیم  | ژنوتیپ      | اروسیک اسید<br>(درصد) | اروسیک اسید<br>(درصد) |
|----------------------------------|-------------------------------|-------------|-----------------------|-----------------------|
|                                  |                               |             | سال اول زراعی (۹۵-۹۶) | سال دوم زراعی (۹۶-۹۷) |
| شاهد                             | عدم محلول پاشی                | OG × AL     | ۰/۳۴ b                | ۰/۳۲ b                |
|                                  |                               | RGS × SLM   | ۰/۳۶ b                | ۰/۳۴ b                |
|                                  |                               | DALGAN      | ۰/۳۵ b                | ۰/۳۳ b                |
|                                  |                               | RGS 003     | ۰/۴۲ a                | ۰/۴۰ a                |
|                                  |                               | RGS × OKAPI | ۰/۴۴ a                | ۰/۴۱ a                |
|                                  | LSD (0.05)                    |             | ۰/۰۲                  | ۰/۰۴                  |
| شاهد                             | محلول پاشی<br>(۴ گرم در لیتر) | OG × AL     | ۰/۳۲ b                | ۰/۳۱ bc               |
|                                  |                               | RGS × SLM   | ۰/۳۲ b                | ۰/۲۹ c                |
|                                  |                               | DALGAN      | ۰/۳۱ b                | ۰/۲۹ c                |
|                                  |                               | RGS 003     | ۰/۳۸ a                | ۰/۳۶ ab               |
|                                  |                               | RGS × OKAPI | ۰/۴۲ a                | ۰/۳۹ a                |
|                                  | LSD (0.05)                    |             | ۰/۰۵                  | ۰/۰۵                  |
| قطع آبیاری<br>از مرحله<br>خوردین | عدم محلول پاشی                | OG × AL     | ۰/۳۸ b                | ۰/۳۷ b                |
|                                  |                               | RGS × SLM   | ۰/۴۰ b                | ۰/۳۹ b                |
|                                  |                               | DALGAN      | ۰/۴۱ b                | ۰/۴۰ b                |
|                                  |                               | RGS 003     | ۰/۴۶ a                | ۰/۴۶ a                |
|                                  |                               | RGS × OKAPI | ۰/۴۶ a                | ۰/۴۷ a                |
|                                  | LSD (0.05)                    |             | ۰/۰۴                  | ۰/۰۴                  |
| دهی به بعد                       | محلول پاشی<br>(۴ گرم در لیتر) | OG × AL     | ۰/۳۳ d                | ۰/۲۸ c                |
|                                  |                               | RGS × SLM   | ۰/۳۹ c                | ۰/۳۷ b                |
|                                  |                               | DALGAN      | ۰/۴۰ b                | ۰/۳۹ ab               |
|                                  |                               | RGS 003     | ۰/۴۳ a                | ۰/۴۴ a                |
|                                  |                               | RGS × OKAPI | ۰/۳۹ c                | ۰/۳۹ a                |
|                                  | LSD (0.05)                    |             | ۰/۰۰۸                 | ۰/۰۰۶                 |

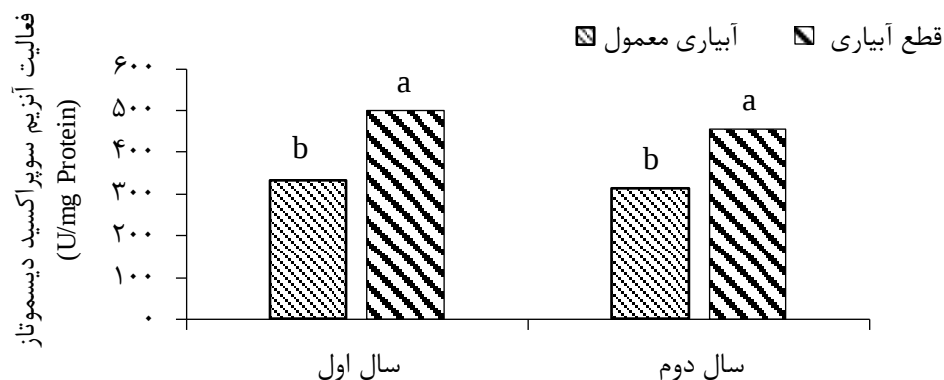
میانگین‌های هر ستون با حروف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار می‌باشند.

## ۴-۴-۱۰ فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدان

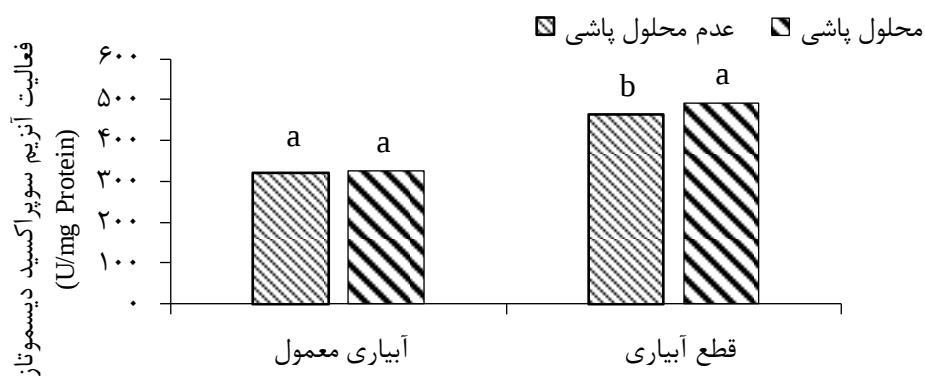
فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی مانند کاتالاز (CAT)، سوپراکسید دیسموتاز (SOD) و پراکسیداز (POX) نیز در پاسخ به خشکی و سیلیکون در ژنوتیپ های کلزا متفاوت بود.

### ۴-۴-۱۰-۱ سوپر اکسید دیسموتاز

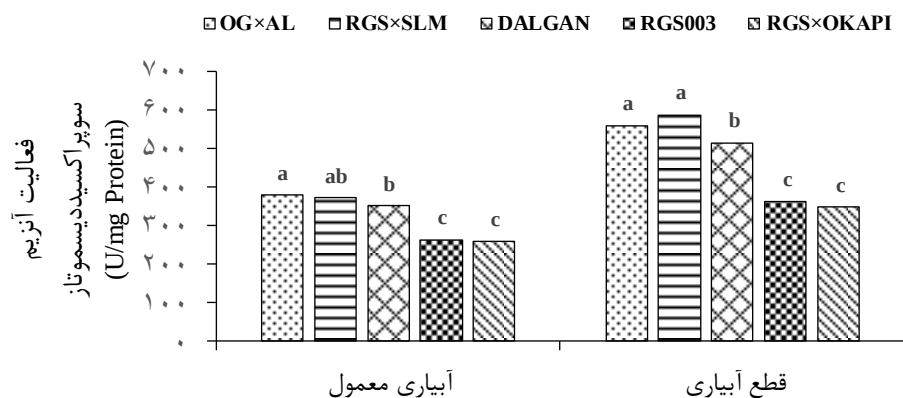
نتایج تجزیه مرکب داده ها بر آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز نشان داد که اثرات ساده و اثرات متقابل سال×آبیاری، آبیاری×سیلیکات پتاسیم و آبیاری×ژنوتیپ در سطح یک درصد معنی دار بود (جدول ۴-۱۷). برهمکنش سال×آبیاری نشان داد، در هر دو سال اجرای آزمایش با قطع آبیاری آنزیم SOD افزایش یافت. در سال اول، قطع آبیاری سبب افزایش ۴۹ درصدی و در سال دوم موجب افزایش ۴۵ درصدی در SOD گردید (شکل ۴-۴۱). برهمکنش آبیاری×سیلیکات پتاسیم نیز نشان داد که در قطع آبیاری، محلول پاشی سیلیکات پتاسیم منجر به افزایش ۷ درصدی SOD گردید، ولی در آبیاری معمول اختلاف بین شرایط استفاده و عدم استفاده از سیلیکات پتاسیم با وجود موثر بودن، معنی دار نبود. قطع آبیاری در شرایط عدم محلول پاشی سیلیکات پتاسیم سبب افزایش ۴۳ درصدی و استفاده از سیلیکات پتاسیم سبب افزایش ۵۱ درصدی فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز گردید (شکل ۴-۴۲). برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ نشان داد که در قطع آبیاری میزان آنزیم SOD را در ژنوتیپ های مورد بررسی نسبت به شرایط آبیاری معمولی افزایش داد. ژنوتیپ OG×AL بیشترین فعالیت آنزیم را در دو سطح آبیاری به خود اختصاص داد، در حالی که ژنوتیپ های RGS003 و RGS×OKAPI کمترین SOD را داشتند (شکل ۴-۴۳). همچنین قطع آبیاری نسبت به شاهد (آبیاری معمول) به ترتیب منجر به افزایش ۴۷/۳۱، ۵۷/۹۸، ۴۶/۶۱، ۳۷/۷۱ و ۳۴/۳۰ درصدی آنزیم SOD در ژنوتیپ های OG×AL، RGS×SLM، DALGAN، RGS003 و RGS×OKAPI گردید، که نشان از واکنش متفاوت ارقام به تنش خشکی داشت.



شکل ۴-۴۱- برهمکنش سال×آبیاری بر آنزیم سوپراکسید دیسموتاز به روش برش دهی. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.



شکل ۴-۴۲- برهمکنش آبیاری×سیلیکات پتاسیم بر آنزیم سوپراکسید دیسموتاز به روش برش دهی. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.



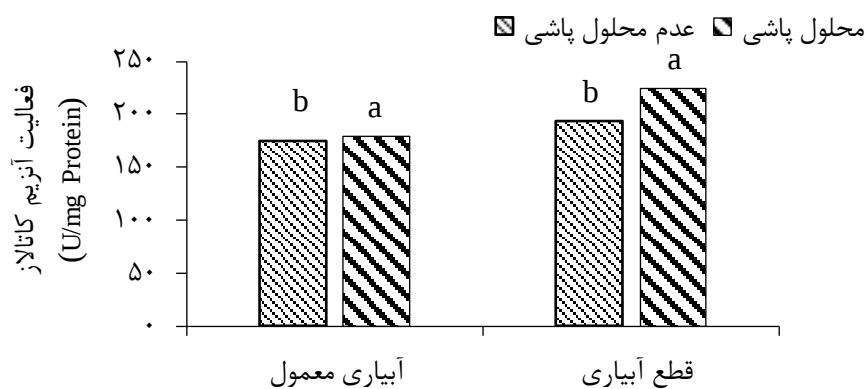
شکل ۴-۴۳- برهمکنش سطوح آبیاری×ژنوتیپ بر آنزیم سوپراکسید دیسموتاز به روش برش دهی. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

در توضیح نقش سیلیکات‌پتاسیم می‌توان چنین بیان کرد که با اعمال تنش خشکی میزان فعالیت آنزیم SOD به عنوان یک آنزیم مهم تولید کننده  $H_2O_2$  افزایش، به تبع آن میزان  $H_2O_2$  نیز افزایش می‌یابد. سیلیکون با افزایش فعالیت آنزیم‌های تجزیه‌کننده‌ی  $H_2O_2$  به آب و اکسیژن و همچنین افزایش سطوح کلروفیلی و در نتیجه آن تولید پروتئین کل و تجمع پرولین بیشتر و تحریک جذب آب بیشتر به عنوان آمینواسید افزایش دهنده پتانسیل اسمزی نقش مستقیم و تأثیرگذاری در شرایط تنش ایفا می‌کند.

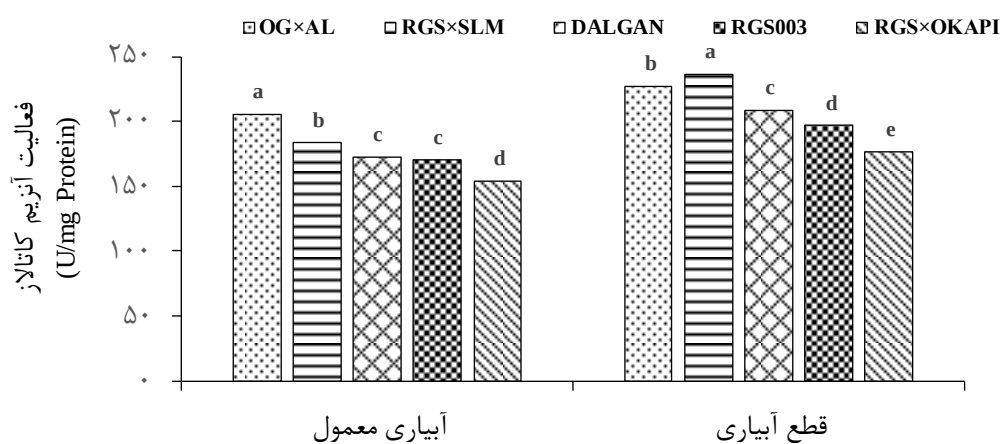
کاربرد ترکیبات سیلیکاتی به طور گسترده‌ای باعث کاهش آسیب اکسیداتیو از طریق افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان تحت تنش خشکی در گیاهان گندم (احمد و حداد، ۲۰۱۱)، آفتابگردان (گونس و همکاران، ۲۰۰۸)، گوجه‌فرنگی (شی و همکاران، ۲۰۱۴) و نخود (گونس و همکاران، ۲۰۰۷) گردید. تجزیه و تحلیل واکنش زنجیره‌ای پلیمراز نشان داد که کاربرد سیلیکون باعث افزایش بیان چهار ژن چرخه AsA-GSH، پنج ژن مسیر بیوسنتز فلاونوئید و کاهش غلظت MDA و  $H_2O_2$  در گندم تحت تنش خشکی می‌شود، که نشان می‌دهد این عنصر نقشی اساسی در تنظیم رونویسی سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدانی در پاسخ به خشکی دارد (ما و همکاران، ۲۰۱۶).

#### ۴-۴-۱۰-۲ کاتالاز

نتایج تجزیه مرکب داده‌ها بر آنزیم کاتالاز نشان داد که اثرات ساده آبیاری، سیلیکات پتاسیم و ژنوتیپ و همچنین اثرات متقابل آبیاری×سیلیکات پتاسیم، آبیاری×ژنوتیپ و سیلیکات پتاسیم×ژنوتیپ در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۴-۱۷). برهمکنش آبیاری×سیلیکات پتاسیم نشان داد که در آبیاری معمول، محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم منجر به افزایش سه درصدی CAT گردید و در قطع آبیاری، کاربرد آن منجر به افزایش ۱۶ درصدی CAT گردید (شکل ۴-۴۴). قطع آبیاری در شرایط عدم محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم باعث افزایش ۱۱ درصدی نسبت به شرایط آبیاری معمول و در کاربرد سیلیکات پتاسیم در شرایط قطع آبیاری منجر به افزایش ۲۵ درصدی CAT نسبت به شرایط آبیاری معمول گردید (شکل ۴-۴۴). چنین استنباط می‌شود که نقش سیلیکات پتاسیم در خشکی به دلیل افزایش در فعالیت آنزیم‌های اکسنده همراه بوده و باعث کاهش خسارت اکسیداتیو ناشی از گونه‌های فعال اکسیژن که در قطع آبیاری تولید می‌گردند، می‌شود و از فرایندهای فیزیولوژیکی که در معرض تنش قرار گرفته‌اند محافظت می‌کند. برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ بر آنزیم CAT نشان داد که با قطع آبیاری در ژنوتیپ‌های مورد بررسی مقدار آن نسبت به شرایط آبیاری معمول افزایش یافت که علت افزایش فعالیت آن در قطع آبیاری این است که با کاهش آب قابل دسترس برای گیاه، CAT به‌عنوان یکی از اجزای مهم مکانیسم دفاعی در گیاه عمل می‌کند. در آبیاری معمول، ژنوتیپ OG×AL بیشترین و ژنوتیپ RGS×OKAPI کمترین فعالیت CAT را به خود اختصاص دادند. در شرایط قطع آبیاری نیز ژنوتیپ RGS×SLM بیشترین و ژنوتیپ RGS×OKAPI کمترین فعالیت آنزیم را به خود اختصاص داد (شکل ۴-۴۵). قطع آبیاری نسبت به شاهد (آبیاری معمول) منجر به افزایش ۱۰/۴۹، ۲۸/۸۴، ۲۰/۸۶، ۱۵/۷۴ و ۱۴/۳۴ درصدی آنزیم CAT به ترتیب در ژنوتیپ‌های OG×AL، RGS×SLM، DALGAN، RGS003 و RGS×OKAPI گردید (شکل ۴-۴۵).



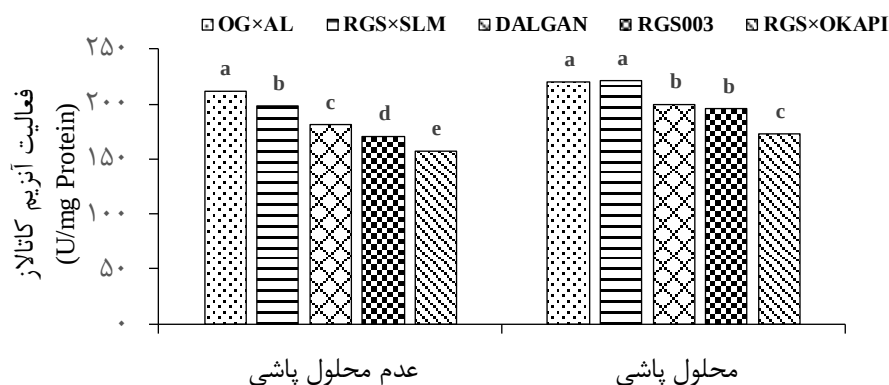
شکل ۴-۴- برهمکنش آبیاری × سیلیکات پتاسیم بر آنزیم کاتالاز به روش برش دهی. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.



شکل ۴-۴- برهمکنش سطوح آبیاری × ژنوتیپ بر آنزیم کاتالاز به روش برش دهی. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

در شرایط قطع آبیاری، بیشترین میزان افزایش CAT در ژنوتیپ RGS×SLM بود، که این ژنوتیپ در این شرایط تنش نیز بیشترین عملکرد دانه را داشت. افزایش آنزیمی در شرایط تنش خشکی نشان دهنده اثر آنزیم‌های آنتی اکسیدانت در کاهش خسارات تنش اکسیداتیو و نقش مهم آنها در مقابله با رادیکال‌های آزاد می‌باشد. سیلیکات پتاسیم با افزایش آنزیم SOD که اولین خط دفاعی در برابر

صدمات حاصل از گونه‌های فعال اکسیژن است و همچنین CAT باعث ایجاد مقاومت به خشکی در ژنوتیپ RGS×SLM شد. برهمکنش سیلیکات پتاسیم×ژنوتیپ نیز نشان داد که محلول پاشی سیلیکات پتاسیم موجب افزایش CAT در ژنوتیپ‌های مورد بررسی نسبت به شرایط عدم محلول پاشی شد. در شرایط عدم محلول پاشی سیلیکات پتاسیم، ژنوتیپ OG×AL بیشترین و ژنوتیپ RGS×OKAPI کمترین فعالیت آنزیم را به خود اختصاص دادند. در محلول پاشی سیلیکات پتاسیم نیز ژنوتیپ‌های RGS×SLM و OG×AL بیشترین و ژنوتیپ RGS×OKAPI کمترین فعالیت آنزیم را به خود اختصاص دادند (شکل ۴-۴۶). محلول پاشی سیلیکات پتاسیم نسبت به شاهد (عدم محلول پاشی) منجر به افزایش ۳/۸۲، ۱۱/۲۷، ۱۰/۴۹، ۱۴/۵۸ و ۱۰/۶۶ درصدی آنزیم CAT به ترتیب در ژنوتیپ‌های OG×AL، RGS×SLM، DALGAN، RGS003 و RGS×OKAPI گردید (شکل ۴-۴۶).



شکل ۴-۴۶- برهمکنش سیلیکات پتاسیم×ژنوتیپ بر آنزیم کاتالاز به روش برش دهی. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

گزارش‌ها همچنین حاکی از آن بود که تنش خشکی فعالیت آنزیم کاتالاز را در کلزا (*Brassica napus*) افزایش داد (توحیدی مقدم و همکاران، ۲۰۰۹؛ لطفی و همکاران، ۲۰۱۵؛ لیو و همکاران، ۲۰۱۱). همچنین گونگ و همکاران (۲۰۰۵) ادعان داشتند که افزایش تحمل به خشکی در استفاده از ترکیبات حاوی سیلیکون در گیاه گندم به افزایش دفاع آنتی‌اکسیدانی مربوط بوده، که نتیجه این

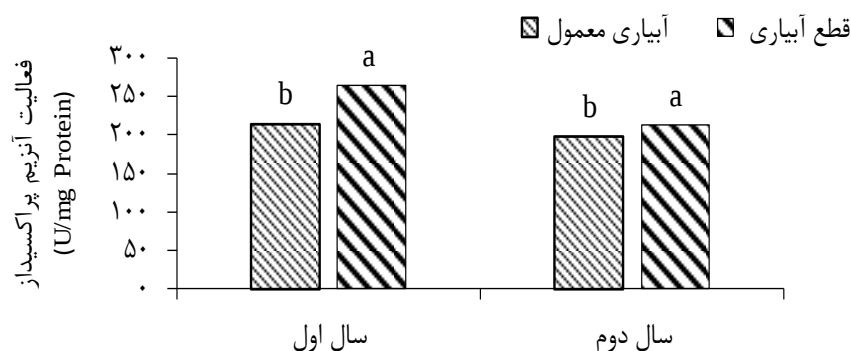
افزایش، کاهش آسیب‌های اکسیداتیو مولکول‌های عملکردی سلولی تحریک شده توسط تولید زیاد ROS تحت تنش خشکی و حفظ فرایندهای فیزیولوژیکی گیاه تحت تنش خشکی بود. میزان افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در ارقام متحمل عموماً بیشتر بوده و ارتباط بسیار زیادی بین تحمل به کم‌آبی با فعالیت سیستم آنتی‌اکسیدانی گیاه کلزا و سایر گیاهان وجود دارد (فاروق و همکاران، ۲۰۰۹).

#### ۴-۴-۱۰-۳ پراکسیداز

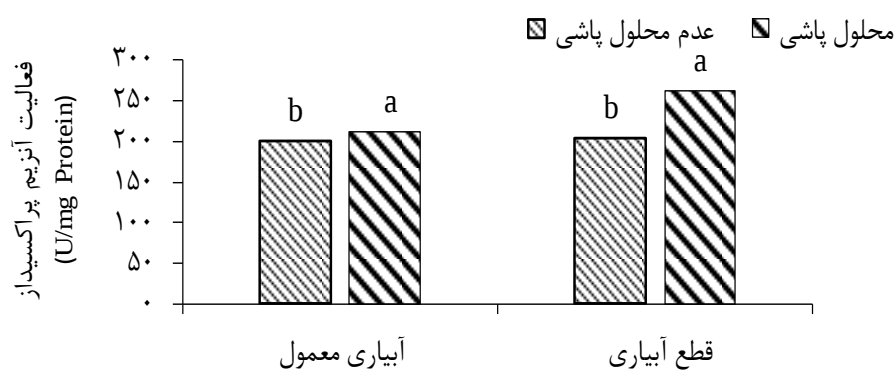
نتایج تجزیه مرکب داده‌ها بر آنزیم پراکسیداز نشان داد که اثرات ساده، اثرات متقابل سال×آبیاری، آبیاری×سیلیکات‌پتاسیم و آبیاری×ژنوتیپ معنی‌دار بود (جدول ۴-۱۷). برهمکنش سال×آبیاری نشان داد، در هر دو سال اجرای آزمایش با قطع آبیاری، آنزیم POX افزایش یافت. در سال اول، اعمال تنش سبب افزایش ۲۳ درصدی و در سال دوم سبب افزایش ۷ درصدی در فعالیت آنزیم پراکسیداز گردید. علت این تفاوت شاید افزایش بارندگی در سال دوم زراعی نسبت به سال اول باشد که باعث شد سطح آنزیم در سال دوم نسبت به در سال اول کمتر گردد (شکل ۴-۴۷). برهمکنش آبیاری×سیلیکات‌پتاسیم نیز نشان داد که در قطع آبیاری، محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم منجر به افزایش ۲۸ درصدی و در شرایط آبیاری معمول کاربرد سیلیکات پتاسیم منجر به افزایش ۴۸-۴ درصدی فعالیت این آنزیم نسبت به شرایط عدم کاربرد سیلیکات پتاسیم گردید (شکل ۴-۴۸). برهمکنش آبیاری×ژنوتیپ بر آنزیم POX نشان داد که ژنوتیپ‌های مورد بررسی پاسخ متفاوتی به سطوح آبیاری داشتند و تنش منجر به افزایش POX در آنها شد. به‌طوری‌که در شرایط آبیاری معمول، ژنوتیپ RGS×SLM بیشترین و ژنوتیپ‌های RGS003 و RGS×OKAPI کمترین فعالیت آنزیم را به خود اختصاص دادند. در شرایط قطع آبیاری نیز ژنوتیپ RGS×SLM بیشترین و ژنوتیپ‌های RGS003 و RGS×OKAPI کمترین فعالیت آنزیم را به خود اختصاص دادند (شکل ۴-۴۹). قطع آبیاری باعث افزایش ۱۷، ۲۱، ۱۱، ۵ و ۷ درصدی آنزیم POX به‌ترتیب در ژنوتیپ‌های OG×AL، RGS×SLM، DALGAN، RGS003 و RGS×OKAPI شد.

محققان گزارش کردند که Si به طور قابل توجهی فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان SOD، APX و POX را در ترکیبات حاوی سیلیکون و ارقام متفاوت افزایش داد (رحمان، ۲۰۱۶). علاوه‌براین، ترکیبات سیلیکاتی، باعث کاهش نفوذپذیری غشاهای پلاسمایی سلول می‌گردد. افزایش پایداری غشاهای و کاهش نشت غیرآلی که ناشی از افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی و غیرآنزیمی است،

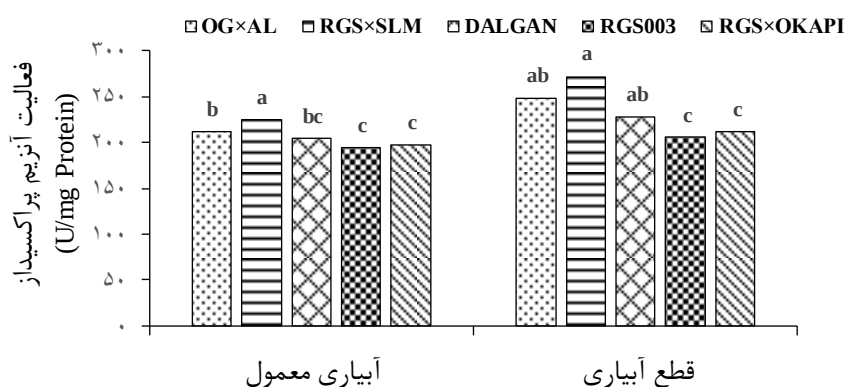
می‌تواند به یک مکانیسم مهم تبدیل شود (مرواد و همکاران، ۲۰۱۸). لی‌پینگ و همکاران (۲۰۰۶) بیان کردند که ترکیبات سیلیکاتی در ذرت میزان بیان ژن POX و نیز فعالیت آنزیم را نسبت به تیمار خشکی و شاهد افزایش داد. تحت شرایط تنش خشکی تأثیر ترکیبات سیلیکاتی بر میزان فعالیت آنزیم‌های ضد اکسنده در گیاه ذرت بررسی شد. ترکیبات حاوی Si، باعث افزایش در فعالیت آنزیم‌های CAT، SOD، APX و POX در ذرت شد. به‌طوری‌که افزایش فعالیت این آنزیم‌ها در تیمار سیلیکون+خشکی در مقایسه با تیمار خشکی معنی‌دار بود (لی‌پینگ و همکاران، ۲۰۰۶). شارما و همکاران (۲۰۰۵) افزایش فعالیت آنزیم POX در اثر تنش خشکی در برنج را نیز گزارش کردند. آنها دریافتند که افزایش فعالیت POX در گیاهان تحت تنش خشکی با واکنش‌های اکسیدکننده به وجود آورنده رادیکال‌های آزاد و پراکسیدهای آلی همبستگی دارد و POX نقش موثری در پاکسازی  $H_2O_2$  دارد. در آزمایش اثرات Si بر گیاه لوبیا توسط پولانکو و همکاران (۲۰۱۴)، غلظت سیلیکون در برگ‌های گیاهان تحت تأثیر تیمار ترکیبات سیلیکاتی در مقایسه با گیاهان شاهد، به میزان ۳۳ درصد افزایش یافت.



شکل ۴-۴۷- برهمکنش سال×آبیاری بر آنزیم پراکسیداز به روش برش دهی. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.



شکل ۴-۴۸- برهمکنش آبیاری×سیلیکات پتاسیم بر آنزیم پراکسیداز به روش برش دهی. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.



شکل ۴-۴۹- برهمکنش سطوح آبیاری×ژنوتیپ بر آنزیم پراکسیداز به روش برش دهی. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

جدول ۴-۱۷- نتایج تجزیه مرکب برخی صفات مورد بررسی کلزا

| منابع تغییرات                          | درجه آزادی | سوپراکسید دیسموتاز    | کاتالاز               | پراکسیداز            |
|----------------------------------------|------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| سال                                    | ۱          | ۲۹۳۶۵/۶۶**            | ۱۶۱۶/۹۶ <sup>ns</sup> | ۴۵۷۷۵/۱۹*            |
| سال (تکرار)                            | ۴          | ۱۱۸/۳۹                | ۹۶۸۰/۱۷               | ۲۷۵۰/۲۳              |
| آبیاری                                 | ۱          | ۷۰۴۳۰۶/۳۷**           | ۳۰۴۹۱/۷۸**            | ۲۱۷۱۷/۴۴**           |
| سال × آبیاری                           | ۱          | ۴۱۶۵/۴۰**             | ۴۴/۵۸ <sup>ns</sup>   | ۱۵۱۶۱/۴۱**           |
| سیلیکات پتاسیم                         | ۱          | ۹۴۷۰/۳۴**             | ۹۶۶۳/۶۵**             | ۳۵۰۳۷/۹۱**           |
| سال × سیلیکات پتاسیم                   | ۱          | ۳۰۱/۳۴ <sup>ns</sup>  | ۰/۵۰۵ <sup>ns</sup>   | ۳۹۲/۶۹ <sup>ns</sup> |
| آبیاری × سیلیکات پتاسیم                | ۱          | ۴۸۵۷**                | ۴۹۸۲/۶۹**             | ۱۵۹۸۳/۸۲**           |
| سال × آبیاری × سیلیکات پتاسیم          | ۱          | ۳۳۷/۴۷ <sup>ns</sup>  | ۱۱/۰۸ <sup>ns</sup>   | ۲/۱۷۶ <sup>ns</sup>  |
| خطای (الف)                             | ۱۲         | ۲۳۶/۲۳                | ۵۶/۷۲                 | ۳۸۶/۵۸               |
| ژنوتیپ                                 | ۴          | ۱۸۲۴۷۳/۰۸**           | ۱۰۱۴۶/۶۵**            | ۹۴۱۱/۹۶**            |
| سال × ژنوتیپ                           | ۴          | ۳۳۶۱/۴۷ <sup>ns</sup> | ۱۰/۹۵ <sup>ns</sup>   | ۲۲۱/۴۶ <sup>ns</sup> |
| آبیاری × ژنوتیپ                        | ۴          | ۱۹۷۰۶/۶۹**            | ۱۰۲۸/۶۴**             | ۱۴۵۰/۷۸**            |
| سال × آبیاری × ژنوتیپ                  | ۴          | ۵۵۵/۵۴ <sup>ns</sup>  | ۶۰/۷۷ <sup>ns</sup>   | ۹۷/۶۳ <sup>ns</sup>  |
| سیلیکات پتاسیم × ژنوتیپ                | ۴          | ۲۹۰۹/۳۶ <sup>ns</sup> | ۲۶۰/۸۸**              | ۵۵۱/۵۰ <sup>ns</sup> |
| سال × سیلیکات پتاسیم × ژنوتیپ          | ۴          | ۳۴۰۶/۶۸ <sup>ns</sup> | ۵/۹۳ <sup>ns</sup>    | ۳۷۷/۷۵ <sup>ns</sup> |
| آبیاری × سیلیکات پتاسیم × ژنوتیپ       | ۴          | ۱۸۱۰/۱۰ <sup>ns</sup> | ۱۳۴/۳۰ <sup>ns</sup>  | ۵۵۱/۸۵ <sup>ns</sup> |
| سال × آبیاری × سیلیکات پتاسیم × ژنوتیپ | ۴          | ۵۵۳/۵۷ <sup>ns</sup>  | ۵/۷۰ <sup>ns</sup>    | ۷۴/۷۳ <sup>ns</sup>  |
| خطای (ب)                               | ۶۴         | ۲۰۲۵/۶۰               | ۵۸/۰۳                 | ۳۵۵/۴۶               |
| ضریب تغییرات (%)                       |            | ۱۱/۲۱                 | ۳/۳۰                  | ۸/۵۷                 |

\*، \*\* و ns به ترتیب معنی داری در سطوح احتمال پنج و یک درصد و عدم معنی دار.

## ۴-۵ تجزیه همبستگی صفات کلزا

بررسی همبستگی صفات نشان داد که عملکرد دانه با صفاتی چون عملکرد بیولوژیکی، تعداد خورجین در بوته، تعداد دانه در خورجین، وزن هزار دانه، عملکرد بیولوژیک، عملکرد و درصد روغن، کلروفیل کل و محتوای نسبی برگ همبستگی مثبت و معنی دار داشت. بیشترین همبستگی عملکرد

دانه با عملکرد روغن (\*\*/۹۹/۰) و عملکرد بیولوژیکی (\*\*/۹۱/۰) بود و کمترین آن با محتوای نسبی آب برگ (\*\*/۴۴/۰) مشاهده گردید (جدول ۴-۱۸). همبستگی مثبت و معنی‌دار اجزای عملکرد با عملکرد دانه نشان‌دهنده اهمیت این صفات می‌باشد و هرگونه تنش خشکی در مراحل مهم زایشی، با تأثیر منفی بر این صفات می‌تواند کاهش عملکرد را به همراه داشته باشد. همچنین هرگونه فعالیت مدیریتی در مزرعه، همچون محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم می‌تواند با تأثیر مثبت بر صفات مهم و تأثیرگذار بر عملکرد دانه، همبستگی را مثبت و معنی‌دار نماید. همچنین بین عملکرد دانه و کلروفیل کل رابطه مستقیم و معنی‌دار وجود داشت. به نظر می‌رسد که افزایش در میزان کلروفیل با افزایش در میزان فتوسنتز همراه بوده که در نهایت منجر به تثبیت بیشتر کربن و عملکرد دانه شده است. عملکرد دانه با مقاومت روزنه‌ای، پرولین، گلوکوزینولات دانه، کربوهیدرات محلول و آنزیم POX همبستگی منفی و معنی‌دار نشان داد. افزایش در این صفات بیانگر وقوع تنش در گیاه بوده که طبعاً کاهش عملکرد را به دنبال خواهد داشت (جدول ۴-۱۸). بررسی همبستگی صفت عملکرد بیولوژیک نیز نشان داد به ترتیب بیشترین همبستگی مثبت و منفی صفت عملکرد بیولوژیک با صفات عملکرد دانه (\*\*/۹۱/۰) و کربوهیدرات محلول برگ (\*\*/۸۶/۰-) بود (جدول ۴-۱۸). کربوهیدرات‌ها ثبات دهنده غشاهای سلولی و حفظ‌کننده تورژسانس سلول‌ها را بر عهده دارند و در حقیقت، قندهای محلول در پاسخ به تنش خشکی تجمع می‌یابند و افزایش آنها به دلیل تنش نشان از کاهش عملکرد دارد. عملکرد دانه کلزا بیشترین همبستگی منفی را با صفت مقاومت روزنه‌ای (\*\*/۷۸/۰-) داشت (جدول ۴-۱۸). مقاومت روزنه‌ای با کاهش فعالیت فتوسنتز و همچنین کاهش اجزای عملکرد دانه کلزا موجب کاهش عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک می‌گردد. بیشترین همبستگی درصد روغن دانه کلزا با صفت کلروفیل کل (\*\*/۷۷/۰) بود، درحالی‌که بیشترین همبستگی منفی را نیز با صفت کربوهیدرات محلول برگ (\*\*/۵۲/۰-) داشت (جدول ۴-۱۸). بررسی همبستگی میزان پرولین نشان داد بالاترین همبستگی منفی را با صفات عملکرد بیولوژیک (\*\*/۸۱/۰-) و وزن هزار دانه (\*\*/۷۸/۰-) داشت. بررسی همبستگی کربوهیدرات محلول برگ نیز نشان داد، بالاترین همبستگی منفی با صفات عملکرد روغن (\*\*/۸۸/۰-) و

عملکرد بیولوژیک ( $^{**}0/86$ -) کلزا داشت، در حالی که بیشترین همبستگی مثبت و معنی دار را نسبت به پرولین ( $^{**}0/78$ ) داشت (جدول ۴-۱۸). بررسی همبستگی میزان مقاومت روزه‌ای نیز نشان داد، بالاترین همبستگی منفی را با صفات محتوای نسبی آب برگ ( $^{**}0/81$ -) داشت و بالاترین همبستگی مثبت را با سه آنزیم SOD، CAT و POX داشت. کلروفیل کل برگ نیز بیشترین همبستگی خطی خود را با صفت عملکرد دانه ( $^{**}0/87$ ) و عملکرد بیولوژیک ( $^{**}0/88$ ) داشت که نشان دهنده آن است که ژنوتیپ با کلروفیل بیشتر توانایی تولید مواد پرورده بیشتری دارد که منجر به افزایش عملکرد می‌شود و کلروفیل بیشترین همبستگی منفی را نیز با SOD ( $^{**}0/81$ -) داشت (جدول ۴-۱۸). این همبستگی‌ها نشان می‌دهد تنش خشکی با افزایش مقاومت روزه‌ای، میزان پرولین برگ، کربوهیدرات برگ و دیگر عوامل تأثیرگذار موجب کاهش عملکرد دانه و دیگر ویژگی‌های کلزا می‌شود. اعمال هر تیماری که موجب کاهش مقدار صفات مقاومت روزه‌ای، میزان پرولین برگ و کربوهیدرات برگ گردد، عملاً موجب افزایش عملکرد کلزا می‌شود، بنابراین محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم و آبیاری کامل می‌تواند موجب افزایش عملکرد کلزا گردد. بیشترین همبستگی مثبت صفت محتوای نسبی آب برگ کلزا با صفت کلروفیل کل ( $^{**}0/77$ ) بود، با این حال این صفت در شرایط تیمارهای اعمال شده بیشترین همبستگی منفی را با آنزیم SOD ( $^{**}0/84$ -) داشت (جدول ۴-۱۸). به نظر می‌رسد با اعمال سیلیکات پتاسیم میزان فتوسنتز افزایش یافته و به دنبال آن میزان کلروفیل و محتوای نسبی آب برگ افزایش یافته که باعث افزایش عملکرد و اجزای عملکرد شد. صفت درصد روغن بیشترین همبستگی مثبت را با کلروفیل کل ( $^{**}0/77$ ) داشت، درحالی‌که به ترتیب بیشترین همبستگی منفی را با صفت کربوهیدرات محلول برگ ( $^{**}0/71$ -) داشت. آنزیم POX بیشترین همبستگی مثبت را با آنزیم‌های SOD و CAT ( $^{**}0/89$ ) داشت، همان‌طور که در شرایط تنش هر سه افزایش یافتند (جدول ۴-۱۸).

جدول ۴-۱۸- ضرایب همبستگی پیرسون بین برخی صفات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی کلزا

| صفات مورد بررسی      | تعداد خورجین | تعداد دانه در | وزن هزار دانه | عملکرد     | محتوای نسبی | مقاومت    | کلروفیل کل | عملکرد دانه | درصد روغن  | علمکرد روغن | گلوگوزینولات دانه | پرولین    | کربوهیدرات | سوپراکسید | کاتالاز   | پراکسیداز |
|----------------------|--------------|---------------|---------------|------------|-------------|-----------|------------|-------------|------------|-------------|-------------------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|
| تعداد خورجین در بوته | در بوته      | خورجین        | ۱             | ۱          | برگ         | روزنه‌ای  | ۱          | دانه        | دانه       | دانه        | دانه              | محلول     | دیسموتاز   |           |           |           |
| تعداد دانه در خورجین | ۰/۶۷۱۳۳**    | ۱             |               |            |             |           |            |             |            |             |                   |           |            |           |           |           |
| وزن هزار دانه        | ۰/۷۲۹۲۱**    | ۰/۷۲۲۱۳**     | ۱             |            |             |           |            |             |            |             |                   |           |            |           |           |           |
| عملکرد بیولوژیک      | ۰/۸۱۵۶۴**    | ۰/۷۸۱۶۴**     | ۰/۷۲۲۲۹**     | ۱          |             |           |            |             |            |             |                   |           |            |           |           |           |
| محتوای نسبی برگ      | ۰/۴۱۰۴۳**    | ۰/۴۸۶۹۲**     | ۰/۳۰۷۶۳**     | ۰/۴۶۱۲۴**  | ۱           |           |            |             |            |             |                   |           |            |           |           |           |
| مقاومت روزنه‌ای      | ۰/۳۷۲۹۱**    | ۰/۳۴۷۰۵**     | ۰/۳۶۶۲۵**     | ۰/۶۰۵۸۲**  | ۰/۸۱۲۸۵**   | ۱         |            |             |            |             |                   |           |            |           |           |           |
| کلروفیل کل           | ۰/۸۰۱۹۹**    | ۰/۷۲۲۸۷**     | ۰/۶۲۸۸۰**     | ۰/۸۸۷۰۷**  | ۰/۷۷۳۲۵**   | ۰/۷۹۱۵۲** | ۱          |             |            |             |                   |           |            |           |           |           |
| عملکرد دانه          | ۰/۸۲۵۲۹**    | ۰/۷۳۶۳۶**     | ۰/۷۲۵۷۷**     | ۰/۹۱۸۰۱**  | ۰/۴۴۶۰۴**   | ۰/۷۸۶۸۴** | ۰/۷۲۲۸۹**  | ۱           |            |             |                   |           |            |           |           |           |
| درصد روغن دانه       | ۰/۵۱۸۳۵**    | ۰/۵۱۸۳۵**     | ۰/۳۸۱۵۱**     | ۰/۵۱۲۱۵**  | ۰/۴۱۲۲۵*    | ۰/۴۵۶۹۷*  | ۰/۷۷۷۳۸**  | ۰/۵۳۹۷۴**   | ۱          |             |                   |           |            |           |           |           |
| علمکرد روغن دانه     | ۰/۸۳۰۲۳**    | ۰/۸۳۰۲۳**     | ۰/۷۲۲۴۹**     | ۰/۹۱۱۶۹**  | ۰/۴۵۹۵۷**   | ۰/۵۳۰۷۰** | ۰/۸۵۶۹۰**  | ۰/۹۹۲۱۳**   | ۰/۶۳۵۰۹**  | ۱           |                   |           |            |           |           |           |
| گلوگوزینولات دانه    | ۰/۶۹۵۷۰**    | ۰/۴۱۶۰۷**     | ۰/۴۲۲۲۲**     | ۰/۷۱۲۵۹**  | ۰/۰۵۶۰۹ ns  | ۰/۶۴۱۵۷** | ۰/۰۹۴۰۵ ns | ۰/۰۱۴۶**    | ۰/۱۹۲۲۴ ns | ۰/۳۱۶۷۶ ns  | ۱                 |           |            |           |           |           |
| پرولین               | ۰/۶۹۵۴۶**    | ۰/۰۷۰۸۹۰**    | ۰/۷۸۸۲۸**     | ۰/۸۱۶۸۴**  | ۰/۰۷۳۷۰ ns  | ۰/۶۵۴۴۹** | ۰/۷۲۲۶۳**  | ۰/۴۴۴۹۳**   | ۰/۳۶۴۹۸**  | ۰/۷۶۹۹۹**   | ۰/۰۳۴۱**          | ۱         |            |           |           |           |
| کربوهیدرات محلول     | ۰/۷۹۶۱۰**    | ۰/۶۸۱۹۶**     | ۰/۶۴۵۹۱**     | ۰/۸۶۸۱۱**  | ۰/۵۱۵۰*     | ۰/۵۸۶۳۴** | ۰/۷۹۴۴۴**  | ۰/۷۱۰۴۱**   | ۰/۵۲۶۷۵**  | ۰/۸۸۰۹۱**   | ۰/۴۸۱۷۴*          | ۰/۷۸۷۰۱** | ۱          |           |           |           |
| سوپراکسید دیسموتاز   | ۰/۱۸۲۱۹*     | ۰/۰۵۷۹۸ ns    | ۰/۸۰۴۷۸ ns    | ۰/۱۴۵۴۵ ns | ۰/۸۴۵۳۱**   | ۰/۷۵۰۶۶** | ۰/۸۱۸۳۹**  | ۰/۱۲۹۴۴ ns  | ۰/۰۴۶۳۰ ns | ۰/۸۳۰۶۴**   | ۰/۲۷۳۰۵**         | ۰/۲۱۷۱۵** | ۰/۷۴۰۶۷**  | ۱         |           |           |
| کاتالاز              | ۰/۲۸۴۶۸**    | ۰/۲۳۴۶۹**     | ۰/۳۱۷۵۶*      | ۰/۵۴۵۲۷**  | ۰/۴۸۱۶ ns   | ۰/۷۵۳۹**  | ۰/۷۵۷۰۵**  | ۰/۵۱۳۰ ns   | ۰/۲۱۶۴**   | ۰/۶۴۲۷۳**   | ۰/۵۶۸۳۱**         | ۰/۵۱۳۱۰*  | ۰/۷۵۲۹۲**  | ۰/۷۶۱۴۸** | ۱         |           |
| پراکسیداز            | ۰/۳۷۷۱۱**    | ۰/۳۳۳۲۱**     | ۰/۳۳۸۴۴**     | ۰/۶۶۹۶۵**  | ۰/۷۴۹۴۹**   | ۰/۸۶۹۹۸** | ۰/۵۰۲۰۵*   | ۰/۶۳۲۷۳**   | ۰/۲۱۵۲۲**  | ۰/۷۲۲۳۰**   | ۰/۶۰۹۵۶**         | ۰/۶۷۶۰۵** | ۰/۷۶۰۰۸**  | ۰/۸۹۷۵۵** | ۰/۸۹۹۱۰** | ۱         |

\*, \*\*, و ns به ترتیب معنی‌داری در سطوح احتمال پنج و یک درصد و عدم معنی دار.

# فصل پنجم: نتیجہ گیری کلی

## ۵-۱ نتیجه‌گیری

براساس نتایج حاصل از این آزمایش مشاهده شد که صفات مورفولوژیک مورد بررسی در ژنوتیپ‌ها متأثر از تنش خشکی و سیلیکات پتاسیم بود، به‌طوری‌که بیشترین میزان ارتفاع بوته، قطر ساقه، تعداد شاخه در بوته و طول خورجین در شرایط آبیاری معمول و محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم در سال دوم زراعی بدست آمد. در بررسی صفات فیزیولوژیک مشاهده شد تنش خشکی، باعث کاهش صفات RWC و افزایش مقاومت روزنه‌ای و دمای کانوپی شد. مقاومت روزنه با کاهش تبادلات گازی برگ با محیط و همچنین کاهش تعرق گیاه، دمای کانوپی را افزایش داد، در نتیجه آن فتوسنتز برگ کاهش یافته و با تخریب کلروفیل و کاهش فعالیت کلروپلاست، عملکرد کمی صفات مورد بررسی نیز کاهش می‌یابد. در شرایط قطع آبیاری، سیلیکات پتاسیم توانست مقاومت روزنه‌ای را در برخی ژنوتیپ‌ها کاهش دهد، که در این شرایط نیز دمای کانوپی کاهش و محتوای نسبی آب برگ افزایش یافت، که به ترتیب نشان از همبستگی مثبت و منفی آنها با مقاومت روزنه‌ای داشت. بررسی صفات عملکرد و اجزای عملکرد کلزا نشان داد که در شرایط آبیاری معمول و سیلیکات پتاسیم در کلیه صفات با بهبود عملکرد آنها همراه بود. آبیاری معمول و محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم موجب افزایش عملکرد دانه در ژنوتیپ OG×AL گردید. قطع آبیاری با تأثیر بر اجزای عملکرد موجب کاهش عملکرد دانه گردید، این کاهش با توجه به اثرات منفی تنش خشکی بر فتوسنتز و رشد گیاه قابل قبول بود، با این حال در سال زراعی دوم با توجه به افزایش بارندگی تا حدود زیادی این کاهش عملکرد جبران شد. تنش خشکی موجب کاهش عملکرد بیولوژیک تمامی ژنوتیپ‌ها گردید، که نشان از پاسخ متفاوت ارقام نسبت به تنش خشکی بود. در بررسی صفات بیوشیمیایی مشاهده شد، در تنش خشکی صفات مورد بررسی با تغییراتی همراه بود که موجب کاهش کیفیت روغن کلزا شد. در آبیاری معمول به همراه محلول‌پاشی ژنوتیپ OG×AL بالاترین عملکرد روغن دانه (۲۶۰۱ کیلوگرم در هکتار) را داشت. کاربرد سیلیکات پتاسیم، موجب بهبود درصد روغن کلزا گردید. در قطع آبیاری، ژنوتیپ RGS×SLM

بیشترین درصد روغن را به خود اختصاص داد. میزان پرولین برگ در شرایط قطع آبیاری به دلیل نقش آن در تنظیم اسمزی افزایش یافت، این امر موجب حفظ تورژسانس سلول‌ها شد. محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم باعث افزایش میزان کربوهیدرات محلول برگ کلزا گردید. بالاترین میزان کلروفیل کل در ژنوتیپ OG×AL در شرایط آبیاری کامل به همراه محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم بدست آمد. تنش خشکی با شکستن کلروپلاست‌ها و کاهش میزان کلروفیل همراه شد، که این عمل منجر به افزایش پرولین شد و محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم توانست باعث افزایش محتوای کلروفیل در شرایط تنش شود. تنش خشکی باعث افزایش مقدار اروسیک اسید و گلوکوزینولات دانه شد که در نهایت منجر به کاهش کیفیت روغن کلزا گردید، در مقابل در شرایط آبیاری معمول و محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم، مقدار اولئیک اسید و لینولئیک اسید افزایش و مقدار اروسیک اسید و گلوکوزینولات دانه کاهش یافت؛ در نتیجه در شرایط بدون تنش کیفیت روغن کلزا با اعمال محلول‌پاشی بهبود یافت. بررسی مقدار ترکیبات کیفی روغن کلزا در ژنوتیپ‌های مورد مطالعه نشان داد که این ترکیبات با توجه به ماهیت ژنتیکی ژنوتیپ‌ها متفاوت بود، به‌طوری‌که در شرایط آبیاری کامل، ژنوتیپ OG×AL از ترکیبات کیفی بالاتری برخوردار بود، درحالی‌که در شرایط تنش خشکی ژنوتیپ‌های RGS×SLM و DALGAN عملکرد بهتری داشتند. نهایتاً در بررسی فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت مشاهده شد که میزان فعالیت آنزیمی SOD، CAT و POX تحت تنش افزایش یافت. بیشترین فعالیت آنزیم SOD در آبیاری معمول به ژنوتیپ OG×AL و در قطع آبیاری به ژنوتیپ RGS×SLM اختصاص یافت. حضور سیلیکات‌پتاسیم باعث تشدید فعالیت آنزیم SOD شد. بیشترین فعالیت آنزیم CAT در شرایط آبیاری معمول در ژنوتیپ OG×AL و در شرایط قطع آبیاری در ژنوتیپ RGS×SLM مشاهده شد. در شرایط عدم محلول‌پاشی، ژنوتیپ OG×AL بیشترین و در محلول‌پاشی نیز ژنوتیپ RGS×SLM بیشترین فعالیت CAT را به خود اختصاص داد. بیشترین فعالیت آنزیم POX در شرایط آبیاری معمول به ژنوتیپ RGS×SLM و در قطع آبیاری به ژنوتیپ OG×AL تعلق یافت. در شرایطی که رشد کلزا با افزایش دمای محیط در طول دوره زایشی همراه باشد و در این شرایط آب قابل دسترس

کمتری برای رشد گیاه در اختیار باشد، استفاده از ژنوتیپ‌های  $RGS \times SLM$  و  $DALGAN$  می‌تواند عملکرد قابل قبول‌تری را نسبت به ژنوتیپ‌های دیگر داشته باشد. در شرایط اقلیمی که بارندگی‌های محیطی از مقدار قابل قبولی برخوردار است، کاهش مقدار آبیاری یا کم‌آبیاری در صورت اجرا، می‌تواند عملکرد قابل قبولی نسبت به شرایط عدم بارندگی یا بارندگی ناکافی داشته باشد و محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم می‌تواند روش مناسبی باشد. این ترکیب با تأثیر بر فرایندهای آنزیمی و متابولیسمی کلزا، موجب بهبود رشد در شرایط عدم تنش خشکی و یا افزایش مقاومت و تحمل به تنش خشکی در شرایط قطع آبیاری می‌شود. در شرایط بدون تنش، کاربرد محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم موجب افزایش کیفیت روغن کلزا می‌گردد، با این حال تنش خشکی با افزایش ویژگی‌ها کاهش‌دهنده کیفیت روغن کلزا، می‌تواند تأثیر بسزایی در کاهش کیفیت روغن تولیدی داشته باشد. کاربرد سیلیکات‌پتاسیم و ویژگی‌های مدیریتی با تأثیر بر بذور تولیدی باعث افزایش عملکرد یا کاهش هزینه مصرفی در سال‌های بعدی می‌شود. به طوری که تنش خشکی و عدم محلول‌پاشی یا ژنوتیپ باکیفیت بذری پایین، عملاً موجب افزایش مقدار بذر مصرفی برای رسیدن به تراکم لازم در مزرعه می‌شود، بنابراین افزایش ویژگی‌های کیفی بذر می‌تواند رشد کلزا و استقرار بهتر آن را به همراه داشته باشد.

به‌طور کلی نتایج این آزمایش نشان داد ژنوتیپ  $OG \times AL$  نسبت به دیگر ژنوتیپ‌های مورد بررسی از عملکرد و توانایی بالاتری به منظور استفاده از منابع برخوردار است. در شرایط آبیاری کامل و کاربرد محلول‌پاشی ژنوتیپ  $OG \times AL$  بالاترین عملکرد را در صفات مورد بررسی دارا بود، با این وجود در شرایط تنش خشکی و کاربرد محلول‌پاشی ژنوتیپ‌های  $RGS \times SLM$  و  $DALGAN$  از عملکرد قابل قبولی برخوردار بودند.

## ۲-۵ پیشنهادات

- ✓ سیلیکات پتاسیم و آبیاری در سطوح بیشتر مورد مطالعه قرار گیرد.
- ✓ علاوه بر آنزیم‌های مورد بررسی در این مطالعه، به بررسی سایر آنزیم‌های موثر در تنش نیز پرداخته شود.
- ✓ روی سایر اندام‌ها مانند؛ ریشه و ساقه نیز بررسی صورت گیرد.
- ✓ آزمایش در مکان‌های متفاوت، جهت رسیدن به نتایج قطعی با توجه به متغیر بودن شرایط اقلیمی و محیطی از سالی به سال دیگر و مکانی به مکان دیگر تکرار گردد.

## مراجع

- (۱) اسفندیاری ع.، محبوب س.، شکیبا م. ر. و آلیاری ه. (۱۳۸۸) "نقش حجم خزانہ آنتی اکسیدان‌های محلول در آب و پرولین در محافظت از غشاهای سلولی در تنش خشکی" **مجله دانش کشاورزی**، جلد ۱۹، شماره ۲، ص ۱۴۷-۱۳۹.
- (۲) اسماعیلی منزہ ع.، امیدی ح. و بستانی ع. ا. (۱۳۹۱) "تأثیر تنش خشکی بر عملکرد و اجزای عملکرد، پرولین، رنگدانه‌های فتوسنتزی، آب نسبی برگ چند ژنوتیپ گلرنگ" **مجله پژوهش آب در کشاورزی**، دوره ۲۶، شماره ۲، ص ۱۸۷-۱۹۶.
- (۳) اکبری مقدم ح. (۱۳۹۱)، رساله دکتری زراعت: "تسهیم ماده خشک و عکس‌العمل‌های مورفوفیزیولوژیکی ارقام گندم تحت تأثیر تنش خشکی در مراحل مختلف رشد"، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل.
- (۴) آلیاری ه.، شکاری ف. (۱۳۷۹) "دانه‌های روغنی (زراعت و فیزیولوژی)" انتشارات عمیدی، تبریز، ۱۹۲ ص.
- (۵) امیری ا.، قنبری ا.، توسلی ا.، رستگاری پور ف. و روشنی ش. (۱۳۹۱) "بررسی صفات کمی و کیفی ارقام کلزا تحت شرایط تنش رطوبتی و شناسایی بهترین رقم بر اساس شاخص‌های مقاومت" **مجله علمی پژوهشی فیزیولوژی گیاهان زراعی**، دوره ۴، شماره ۱۵، ص ۱۷-۲۸.
- (۶) انوری م. ت. (۱۳۷۶)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد: "اثرات تاریخ کشت بر عملکرد و اجزاء عملکرد ارقام کلزا"، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، دانشکده علوم زراعی.
- (۷) آئین ا. (۱۳۹۱) "تغییرات میزان پرولین، کربوهیدرات‌های محلول و جذب عناصر پتاسیم، روی و کلسیم در ژنوتیپ‌های کنجد (*Sesamum indicum* L.) تحت تنش خشکی" **مجله تولید گیاهان زراعی در شرایط تنش‌های محیطی (علوم زراعی)**، دوره ۴، شماره ۳ ص ۳۹-۴۸.

۸) بروجردنیا م.، بی همتا م. ر.، عالمی سعید خ. و عبدوسی و. (۱۳۹۵) " اثر تنش خشکی بر میزان پرولین، کربوهیدرات‌های محلول، نشت الکتrolیت‌ها و محتوای آب نسبی لوبیا (*Phaseolus vulgaris* L.) " **مجله فیزیولوژی گیاهان زراعی**، دوره ۸، شماره ۲۹، ص ۴۱-۲۳.

۹) پازوکی ع. ر. (۱۳۷۹)، رساله دکتری رشته زراعت: "بررسی و اندازه‌گیری اثر تنش آب بر ویژگی‌های فیزیولوژیک و شاخص‌های مختلف مقاومت به خشکی دو رقم کلزا"، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات اهواز، ۲۵۹ ص.

۱۰) پازوکی ع. ر. (۱۳۸۹) "اثر مقادیر زئولیت و تنش کم آبی بر عملکرد، اجزای عملکرد و شاخص برداشت کلزا (*Brassica napus* L.) در منطقه شهرری" **مجله زراعت و اصلاح نباتات**، دوره ۶، شماره ۱، ص ۱۶ - ۱.

۱۱) پاینده خ.، مجدم م. و دروگر ن. (۱۳۹۷) "کاربرد عناصر ریزمغذی بر عملکرد کمی و کیفی گیاه کلزا در شرایط تنش خشکی" **مجله علمی پژوهشی فیزیولوژی گیاهان زراعی**، دوره ۱۰، شماره ۲ (پیاپی ۳۸)، ص ۲۳-۳۷.

۱۲) ثقه الاسلامی م. ج، امام ی. (۱۳۸۴) "عملکرد گیاهان زراعی، فیزیولوژی و فرایندها" انتشارات دانشگاه شیراز.

۱۳) جاویدفر ف.، ریپلی و.، زینالی خانقاه ح.، عبدمیشانی س.، شاه نجات بوشهری ع. ا. و توکل افشاری ر. (۱۳۸۶) "تعیین نشانگرهای مولکولی پیوسته با تغییرات اسیدلینولنیک در جمعیت دابله‌اپلوئید کلزا (*Brassica napus* L.)" **مجله دانش کشاورزی**، دوره ۱۷، شماره ۳، ص ۴۷-۵۵.

۱۴) جباری ح.، خوش‌خلق‌سیما، ن. ا.، شیرانی‌راد، ا. ح. (۱۳۹۷) "تغییرات ترکیب اسیدهای چرب روغن دانه در ارقام پاییزه کلزا در شرایط تنش خشکی" **مجله پژوهش‌های کاربردی زراعی**، دوره ۳۰، شماره ۳، ص ۶۶-۸۱.

۱۵) جلیلیان ع.، شیروانی ع.، نعمتی ع. و بساطی ج. (۱۳۸۰) "رسی اثرات کم آبیاری بر تولید و اقتصاد چغندر قند در منطقه کرمانشاه" **مجله چغندر قند**، دوره ۱۷، شماره ۱ ص ۱-۱۴.

۱۶) جلیلیان ع.، قبادی ر.، شیرخانی ع. و فرنیان ا. (۱۳۹۳) "بررسی اثرات نیتروژن و تنش خشکی بر اجزای عملکرد، عملکرد و کیفیت دانه" **مجله پژوهش های کاربردی زراعی**، دوره ۲۷، شماره ۱۰۲، ص ۱۵۱-۱۶۰.

۱۷) جمشیدی ن.، شیرانی راد، ا. ح.، تختچین ف.، ناظری پ. و غفاری م. (۱۳۹۱) "ارزیابی ارقام کلزا در شرایط تنش خشکی" **مجله علمی پژوهشی اکوفیزیولوژیک گیاهان زراعی**. ۳۲۳-۳۳۸: (۳)۶.

۱۸) چگنی ه.، گلدانی م.، شیرانی راد ا. ح. و کافی م. (۱۳۹۵) "تأثیر تنش خشکی آخر فصل بر برخی ویژگی های بیوشیمیایی و زراعی لاین های کلزا (*Brassica napus* L.)" **مجله علمی پژوهشی اکوفیزیولوژی گیاهی**، دوره ۸، شماره ۲۷، ص ۳۱-۲۰.

۱۹) حجازی ا. (۱۳۷۷) "بررسی رشد و نمو و میزان محصول چند رقم کلزای اروپایی در شرایط آب و هوایی شمال ورامین" **چکیده مقالات پنجمین کنگره زراعت و اصلاح نباتات ایران**، ص ۱۲۵.

۲۰) حیدری ن.، پوریوسف م. و توکلی ا. (۱۳۹۳) "تأثیر تنش خشکی بر فتوسنتز، پارامترهای وابسته به آن و محتوای نسبی آب گیاه آنیسون (*Pimpinella anisum* L.)" **مجله پژوهش های گیاهی (مجله زیست شناسی ایران)**، جلد ۲۷، شماره ۵ (ویژه نامه ۱)، ص ۸۲۹-۸۳۹.

۲۱) دانشمند، ع. ر.، شیرانی راد ا. ح.، نورمحمدی ق.، زارعی ق. و دانشیان ج. (۱۳۷۸) "بررسی روغن دانه و پروتئین دانه دو رقم کلزا و ارتباط آن با عملکرد روغن دانه و عملکرد پروتئین دانه" **کشاورزی پویا**. ۲۹۵-۳۱۴: (۳)۵.

۲۲) درویش بلوچی م.، پاکنژاد ف.، کاشانی ع.، اردکانی م. ر. و درویشی بلوچی م. (۱۳۸۹) "بررسی تأثیر تنش خشکی و تغذیه برگ بر برخی از عناصر کم مصرف بر پارامترهای فلورسانس کلروفیل، محتوای کلروفیل، RWC پایداری غشاء و عملکرد دانه ذرت (704SC)" **مجله علوم گیاهان زراعی ایران**، دوره ۴۱، شماره ۳، ص ۵۴۳ - ۵۳۱.

(۲۳) روحی م.، بنیان اول م. و شیرانی راد، ا. ح. (۱۳۹۸) "تغییرات کیفی و عملکرد ارقام کلزا (*Brassica napus* L.) به تنش خشکی آخر فصل در شرایط کشت تاخیری" اکوفیزیولوژی گیاهان زراعی. ۱۱۳(۴): ۴۹۹-۵۱۶.

(۲۴) رودی، د.، رحمان پور س. و جاویدفر ف. (۱۳۸۲) "زراعت کلزا" انتشارات دفتر برنامه ریزی رسانه‌های ترویجی. تهران: ۵۳ ص.

(۲۵) زالی ح.، حسنلو ط.، سفالیان ا.، اصغری ع. و زین العابدینی م. (۱۳۹۵) "راه کارهای مناسب گزینش ژنوتیپ های متحمل به تنش خشکی کلزا" پژوهشنامه اصلاح گیاهان زراعی. ۸(۲۰): ۷۷-۹۰.

(۲۶) زواره م. و امام ی. (۱۳۷۹) "راهنمای شناسایی مراحل زندگی در کلزا (*Brassica napus* L.)" مجله علوم زراعی ایران، دوره ۲، شماره ۱، ص ۱-۱۴.

(۲۷) سبجانی ع. ر. (۱۳۷۹)، رساله دکتری رشته زراعت: "بررسی جنبه های فیزیولوژیک تنش آبی و تغذیه پتاسیم در گیاه سیب زمینی" دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، ۲۲۵ ص.

(۲۸) سرمندیا غ. و کوچکی ع.، (۱۳۷۶) "جنبه های فیزیولوژیک زراعت دیم" (ترجمه)، انتشارات جهاد کشاورزی مشهد.

(۲۹) سعیدیان ف. (۱۳۷۵)، پایان نامه کارشناسی ارشد: "بررسی مقاومت به خشکی و کارایی مصرف آب در دو گونه مرتعی- مرتعداری" دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

(۳۰) سید احمدی ع. ر.، بخشنده ع. و قرینه م. ح. (۱۳۹۴) "ارزیابی خصوصیات فیزیولوژیکی و عملکرد دانه ارقام کلزا در شرایط تنش خشکی پایان فصل در شرایط آب و هوایی اهواز" نشریه پژوهش های زراعی ایران، جلد ۱۳، شماره ۱، ص ۸۰-۷۱.

(۳۱) شریعتی ش. و قاضی شهنی زاده پ. (۱۳۷۹) "کلزا" وزارت کشاورزی، معاونت برنامه ریزی و بودجه، ۸۱ ص.

(۳۲) شعبانی ع.، کامکار حقیقی ع. ا.، سپاسخواه ع. ر.، امامی ع. و هنر ت. (۱۳۸۹) "اثر تنش آبی بر عملکرد دانه، اجزای عملکرد و کیفیت کلزای پاییزه (*Brassica napus* L.) رقم لیکورد" **مجله علوم زراعی ایران**، جلد ۱۲، شماره ۴، ص ۴۰۹ - ۴۲۱.

(۳۳) شیخ ف.، تورچی م.، ولیزاده م.، شکیبا م. ر.، پاسبان اسلام ب. و ولیزاده م. (۱۳۸۴) "ارزیابی تحمل به خشکی ارقام بهاره کلزا (*Brassica sp.*)" **مجله دانش کشاورزی**، دوره ۱۵، شماره ۱، ص ۱۶۳-۱۷۴.

(۳۴) شیرانی راد، ا. ح.، نعیمی م. و نصر اصفهانی ش. (۱۳۸۹) "ارزیابی تحمل به خشکی انتهایی در ارقام بهاره و پاییزه کلزا" **مجله علوم زراعی ایران**، جلد ۱۲، شماره ۲، ص ۱۲۶ - ۱۱۲.

(۳۵) شیرانی راد، ا. ح. و دهشیری ع. (۱۳۸۱) "راهنمای کلزا (کاشت، داشت و برداشت)"، اداره تکنولوژی آموزشی، وزارت جهاد کشاورزی، ۱۱۵ ص.

(۳۶) عاشوری م. (۱۳۸۰) "کشت دوم کلزا" انتشارات افراز تهران، ۷۰ ص.

ژ ادعیزی م.، سلطانی ا. و خاوری خراسانی س. (۱۳۸۵) "کلزا: فیزیولوژی، زراعت، به‌نژادی، تکنولوژی زیستی" (ترجمه)، انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد، ۲۳۰ ص.

(۳۸) فیاض ف.، نادری درباغشاهی م. ر.، شیرانی راد ا. م. (۱۳۸۶) "تأثیر تنش کم آبی بر عملکرد و اجزای عملکرد ارقام پیشرفته کلزا در منطقه اصفهان" **یافته‌های نوین کشاورزی**، دوره ۱، شماره ۳، ص ۱۷۷-۱۸۹.

(۳۹) قدرتی غ. (۱۳۹۲) "اثر تنش خشکی بر عملکرد دانه و ویژگیهای کمی ژنوتیپ‌های امیدبخش بهاره کلزا" **فصلنامه علمی پژوهشی فیزیولوژی گیاهان زراعی**، جلد ۵، شماره ۱۸، ص ۶۷-۸۱.

(۴۰) کافی م.، لاهوتی م.، زند ا.، شریفی ح. و گلدانی م. (۱۳۷۸) "فیزیولوژی گیاهی" (ترجمه)، جلد اول، جهاد دانشگاهی واحد مشهد. دانشگاه فردوسی مشهد، ۷۳۲ ص.

(۴۱) کدیور ش.، قوامی م.، قراچورلو م. و دلخوش ب. (۱۳۸۹) "ارزیابی شیمیایی روغن استخراج شده از ارقام مختلف دانه کلزا" **مجله علوم غذایی و تغذیه**، دوره ۷، شماره ۳، ص ۱۹-۲۹.

(۴۲) محمدی ر. (۱۳۸۸) "ضروریات بیوشیمی"، نویسندگان: برگ، ج م تیموزکو ج. و استرایر ل، انتشارات آبیژ، ۱۱۰۳ ص.

(۴۳) مدنی ح.، نادری بروجردی غ.، آقاجانی ح.، چنگیزی م. و پازکی ع. (۱۳۸۷) "تأثیر زمان برداشت بر عملکرد و ریزش دانه کلزا (*Brassica napus* L. cv. *Okapi*) در اراک" **مجله یافته‌های نوین کشاورزی**، دوره ۲، شماره ۳، ص ۲۸۵-۲۹۵.

(۴۴) مراد بیگی ل.، غلامی ا.، شیرانی راد، ا. ح.، عباسدخت ح. و اصغری ح. (۱۳۹۸) "اثر تنش خشکی و کشت تأخیری بر عملکرد دانه، روغن و ترکیب اسیدهای چرب ارقام کلزا" **نشریه دانش کشاورزی و تولید پایدار**، ۲۹(۲): ۱۳۵-۱۵۱.

(۴۵) مرادی‌اقدم ا.، سیف‌زاده س.، شیرانی راد ا. ح.، ولدآبادی ع. و ذاکرین ح. ر. (۱۳۹۷) "اثر قطع آبیاری بر خصوصیات فیزیولوژیکی و عملکرد دانه ارقام کلزا تحت تاریخ‌های مختلف کاشت" **مجله علمی فیزیولوژی گیاهان زراعی**، جلد ۱۰، شماره ۳۸، ص ۷۶-۵۹.

(۴۶) مظفری س.، پیردشتی ه.، اسماعیلی م. ع.، رامنه و.، حیدر زاده ا. و مصطفویان ر. (۱۳۸۹) "اثر تاریخ کاشت و محدودیت منبع و مخزن بر عملکرد دانه و اجزای عملکرد سه رقم کلزا (*Brassica napus* L.)" **مجله علوم زراعی ایران**، دوره ۱۲، شماره ۴، ص ۴۸۲-۴۹۸.

(۴۷) میرزایی م.، معینی ا. و قناتی ف. (۱۳۹۲) "اثر تنش خشکی بر میزبان پرولین و قندهای محلول گیاهچه‌های کلزا (*Brassica napus* L.)" **مجله زیست‌شناسی ایران**، جلد ۲۶، شماره ۱، ص ۹۸-۹۰.

(۴۸) نادری م. ر.، نورمحمدی ق.، مجیدی هروان ا.، درویشی ف.، شیرانی راد، ا. ح. و مدنی ح. (۱۳۸۴) "بررسی عکس‌العمل گلرنگ تابستانه به شدت‌های مختلف تنش خشکی در منطقه اصفهان" **مجله علوم زراعی ایران**، دوره ۷، شماره ۳، ص ۲۱۲-۲۲۵.

(۴۹) نصر ن.، خیامی م.، حیدری ر. و جامعی ر. (۱۳۸۵) "تنوع ژنتیکی در بین واریته‌های انتخابی گیاه کلزا بر اساس بررسی‌های بیوشیمیایی دانه‌ها" **مجله علوم دانشگاه تهران**، دوره ۳۲، شماره ۱، ص ۳۷-۴۰.

۵۰) نواب‌پور س. (۱۳۹۲) " الگوی بیان ژن های القایی در واکنش به تنش خشکی در کلزا (*Brassica napus*) " **مجله به نژادی نهال و بذر (نهال و بذر)**، دوره ۱-۲۹، شماره ۳، ص ۵۳۵-۵۴۹.

۵۱) نورانی آزاد ح. و چوبینه د. (۱۳۸۷) "مطالعه تنش آبی بر بیوماس، قندهای محلول، پرولین، آنزیم‌ها و یون‌ها در گیاه آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.)" **مجله دانش زیستی ایران**، دوره ۳، شماره ۲، ص ۱۹-۲۶.

۵۲) همتی م.، دلخوش ب.، شیرانی راد، ا. ح. و نورمحمدی ق. (۱۳۹۸) "اثر محلول‌پاشی سلنات سدیم بر محتوی سلنیوم دانه و برخی شاخص های فیزیولوژیکی ژنوتیپ‌های کلزا" **نشریه علمی فیزیولوژیکی گیاهان زراعی**. ۱۱(۴۳): ۶۹-۸۴.

۵۳) همراهی س.، حبیبی د.، مدنی ح.، مشهدی م. و بوجار ا. (۱۳۸۷) "اثر سایکوسل و عناصر ریزمغذی بر میزان آنزیم‌های آنتی اکسیدانت به عنوان شاخص های مقاومت به تنش خشکی در کلزا " **فصلنامه یافته های نوین کشاورزی**، سال ۲، شماره ۳، ص ۳۲۹-۳۱۶.

۵۴) ولدیانی ع. ر. (۱۳۸۲)، پایان نامه کارشناسی ارشد: "بررسی سازگاری، فنولوژیک، خصوصیات زراعی و عملکرد ارقام جدید کلزا در منطقه ارومیه" دانشگاه ارومیه.

۵۵) ویسی مال امیری ا.، حق‌پرست ر.، آقایی سربرزه م.، فرشاد فر ع. و رجبی ر. (۱۳۸۵) "ارزیابی تحمل به خشکی ژنوتیپ های جو (*Hordeum Vulgare* L.) با استفاده از خصوصیات فیزیولوژیکی و شاخص‌های تحمل به خشکی " **مجله به نژادی نهال و بذر (نهال و بذر)**، دوره ۱-۲۶، شماره ۱، ص ۴۳-۶۰.

۵۶) یامچی ا. رستگار جزی ف.، قبادی س.، موسوی ا. و کارخانه‌ای ع. ا. (۱۳۸۳) "بیان فراوان ژن Δ1-پرولین-۵-کربوکسیلات سنتتاز (P5CS)، با هدف افزایش مقاومت به تنش‌های اسموتیک در گیاه تراریخت توتون (*Nicotiana tabacum* cv. Xanthi)" **مجله علوم آب و خاک**، شماره ۴، جلد ۸، ص ۴۰-۳۱.

57) Abd El-Gawad H.G., Nashwa A.I.A. and Hikal M.S. (2017) "Effect of Potassium Silicate on Tuber Yield and Biochemical Constituents of Potato Plants Grown Under Drought Stress Conditions" **Middle East J. of. Agric. Res.**, 6, pp718-731.

- 58) Abdalla M.M. (2011) "Beneficial effects of diatomite on growth, the biochemical contents and polymorphic DNA in *Lupinus albus* plants grown under water stress" **Agric. Biol. J. of. NA 2.**, pp 207–220.
- 59) Abedi T. and Pakniyat H. (2010) "Antioxidant enzymes changes in response to drought stress in ten cultivars of oilseed rape (*Brassica napus* L.)" **Czech J. of. Genet Plant Breed.**, **46**, **1**, pp 27-34.
- 60) Aebi, H. (1984) "Catalase. In Methods in Enzymology" **Academic press, Orlando, Fl., USA.** **105**, pp 121-126.
- 61) Agarie S. (1993) "Effect of silicon on growth, dry matter production and photosynthesis in rice plants" **J. of. Crop Prod. Improve. Tech. Asia.**, pp 225-234.
- 62) Ahmad F., Aziz T., Maqsood M. A., Tahir M. A., Kanwal S. (2007) "Effect of silicon application on wheat (*Triticum aestivum* L.) growth under water deficiency stress" **Emir J Food Agric.** **19**(2), pp 1–7.
- 63) Ahmad S.T. and Haddad R. (2011) "Study of silicon effects on antioxidant enzyme activities and osmotic adjustment of wheat under drought stress" **Czech J. of. Genet Plant Breed.**, **47**, **1**, pp 17-27.
- 64) Ahmadikhah A. and Marufinia A. (2016) "Effect of reduced plant height on drought tolerance in rice" **J. of. 3 Biotech.**, **6**, **2**, pp 221.
- 65) Ahmed M., Qadeer U., Ahmed Z.I. and Hassan F.U. (2016) "Improvement of wheat (*Triticum aestivum*) drought tolerance by seed priming with silicon" **J. of. ARCH AGRON SOIL SCI.**, **62**, **3**, pp 299-315.
- 66) Ahmed M., Qadeer U. and Aslam M. A. (2011) "Silicon application and drought tolerance mechanism of sorghum" **J. of. Afr. J. Agric. Res.**, **6**, **3**, pp 594-607.
- 67) Aghdam A.M., Sayfzadeh S., Rad A.S., Valadabadi S.A. and Zakerin H.R. (2019) "The assessment of water stress and delay cropping on quantitative and qualitative traits of rapeseed genotypes" **Ind Crops Prod.** **131**, pp 160-165.
- 68) Al-Barrak K.M. (2006) "Irrigation interval and nitrogen level effects on growth and yield of canola (*Brassica napus* L.)" **Sci. J. King Faisal Univ.**, **7**, **1**, pp 87-102.
- 69) Alvarez J., Snyder G.H., Anderson D.L. and Jones D.B. (1988) "Economics of calcium silicate slag application in a rice-sugarcane rotation in the Everglades" **J. of. Agric. Syst.**, **28**, **3**, pp 179-188.
- 70) Amin M., Ahmad R., Ali, A. Hussain I., Mahmood R., Aslam M. and Lee D.J. (2018) "Influence of silicon fertilization on maize performance under limited water supply" **J. of. Silicon.**, **10**, **2**, pp 177-183.
- 71) Amini S., Ghobadi C. and Yamchi A. (2015) "Proline accumulation and osmotic stress: an overview of P5CS gene in plants" **J. Plant Mol. Breed.** **3**(2), pp 44-55.

- 72) Angadi S.V., Cutforth H.W., McConkey B.G. and Gan Y. (2003) "Yield adjustment by canola grown at different plant populations under semiarid conditions" **J. of. crop sci.**, **43**, 4, pp 1358-1366.
- 73) Anjum S.A., Xie X.Y., Wang L.C., Saleem M.F., Man C. and Lei W. (2011) "Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress" **J. of. Afr. J. Agric. Res.**, **6**, 9, pp 2026-2032.
- 74) Anwaar H. A., Perveen R., Mansha M.Z., Abid M., Sarwar Z.M., Aatif H.M., ... and Rizwan M. (2020) "Assessment of grain yield indices in response to drought stress in wheat (*Triticum aestivum* L.)" **J. of. Saudi J. Biol. Sci.**, **27**, 7, pp 1818-1823.
- 75) Apel K. and Hirt H. (2004) "Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction" **J. of. Annu. Rev. Plant Biol.**, **55**, pp 373-399.
- 76) Aranjuelo I., Molero G., Erice G., Avice J.C. and Nogués S. (2011) "Plant physiology and proteomics reveals the leaf response to drought in alfalfa (*Medicago sativa* L.)" **J. of. Exp. Bot.**, **62**, 1, pp 111-123.
- 77) Arnon D.I. (1949) "Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in Beta vulgaris" **J. of. Plant Physiol.**, **24**, 1, pp 1.
- 78) Arkadiusz A. and Kucińska K. (2016) "Silicon nutrition and crop improvement: recent advances and future perspective. [In] Silicon in plants: advances and future perspective, ed. Durgesh Kumar Tripathi, Vijay Pratap Singh, Parvaiz Ahmad, Devendra Kumar Chauhan, Sheo Mohan Prasad., pp 297-320.
- 79) Ashraf M.F.M.R. and Foolad M.R. (2007) "Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance" **J. of. Environ. Exp. Bot.**, **59**, 2, pp 206-216.
- 80) Ashraf M. (2010) "Inducing drought tolerance in plants: recent advances" **J. Biotechnol.**, **28**, 1, pp 169-183.
- 81) Ashraf M., Afzal M., Ahmed R., Mujeeb F., Sarwar A. and Ali L. (2010) "Alleviation of detrimental effects of NaCl by silicon nutrition in salt-sensitive and salt-tolerant genotypes of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.)" **J. of. plant soil.**, **326**, 1-2, pp 381-391.
- 82) Aslam M.N., Nelson M.N., Kailis S.G., Bayliss K.L., Speijers J. and Cowling W.A. (2009) "Canola oil increases in polyunsaturated fatty acids and decreases in oleic acid in drought-stressed Mediterranean-type environments" **J. of. Plant Breed.**, **128**, 4, pp 348-355.
- 83) Azad M. O. K., Park B. S., Adnan M. et al. (2020) "Silicon biostimulant enhances the growth characteristics and fortifies the bioactive compounds in common and Tartary buckwheat plant" **J. Crop Sci. Biotechnol.** pp 1-9.

- 84) Azadmard-Damirchi, S., and Dutta, P.C. (2006) "Novel solid-phase extraction method to separate 4-desmethyl-, 4-monomethyl-, and 4, 4'-dimethylsterols in vegetable oils" **chromatography.**, **1108**, **2**, pp **183-187**.
- 85) Azarpanah A., Alizadeh O. and Dehghanzadeh H. (2013) "Investigation on proline and carbohydrates accumulation in *Zea mays* L., under water stress condition" **J. of. ELBA BIOFLUX.**, **5**, **1**, pp **47-54**.
- 86) Aziz T. and Gill M. A. (2002) "Silicon nutrition and crop production" A review. **J.Agric. Sci.** **39**, pp **181-187**.
- 87) Bae E.J., Hong A.R., Choi S.M., Lee K.S. and Park Y.B. (2017) "Silicon pretreatment alleviates drought stress and increases antioxidative activity in Kentucky bluegrass" **ITSRJ.**, **13**, **1**, pp **591-600**.
- 88) Bai J., Liu J., Zhang N., Sa R. and Jiang L. (2013) "Effect of salt stress on antioxidant enzymes, soluble sugar and yield of oat" **Adv. J. Food Sci. Technol.**, **5**, **3**, pp **303-309**.
- 89) Bailey (1976) "Hortus Third - A concise dictionary of plants cultivated in the United States and Canada. Bailey, L.H., Bailey, E.Z. (eds)" **Macmillan General Reference, New York., USA.** pp **1290**.
- 90) Bakhat H.F., Hanstein S. and Schubert S. (2009) "Optimal level of silicon for maize (*Zea mays* L. cv AMADEO) growth in nutrient solution under controlled conditions" **The Proc. Of IPNC XVI**, Davis, CA.
- 91) Balasta M.L.F., Perez C.M., Juliano B.O., Vlllareal C.P., Lott J.N. and Roxas D.B. (1989) "Effects of silica level on some properties of *Oryza sativa* straw and hull" **Can J Bot.**, **67**, **8**, pp **2356-2363**.
- 92) Balouchi H.R., Sanavy S.M., Emam Y. and Dolatabadian A. (2009) "UV radiation, elevated CO<sub>2</sub> and water stress effect on growth and photosynthetic characteristics in durum wheat", **PLANT SOIL ENVIRON.**, **55**, **10**, pp **443-453**.
- 93) Bameri M., Abdolshahi R., Mohammadi-Nejad G. h., Yousefi Kh. and Tabatabaie S. M. (2012) "Effect of different microelement treatment on wheat (*triticum aestivum*) growth and yield" **Int. res. j. basic appl. sci.** **3** (1), pp **219-223**.
- 94) Bates L.S., Waldren R.P. and Teare I.D. (1973) "Rapid determination of free proline for water-stress studies" **J. of. plant soil.**, **39**, **1**, pp **205-207**.
- 95) Bauer H., Ache P., Lautner S., Fromm J., Hartung W., Al-Rasheid K. A., ... and Mendel R.R. (2013) "The stomatal response to reduced relative humidity requires guard cell-autonomous ABA synthesis" **Current Biology.**, **23**, **1**, pp **53-57**.
- 96) Baydar H., and Yuce S.,(1996) "Comparison of growth and development, dry matter accumulation and quality characteristics of spring and winter rape (*Brassica napus* L.) cultivars sown in the winter" **Turkish. J. Agric. Forest** **20**(3), pp **237-242**.

- 97) Beauchamp, B.C., and Fedovuch A. (1976) "Superoxide Dismutase Assay and An Assay Applicable to Acrylamide Gel" **Anal Biochem.** **10**, pp 276-287.
- 98) Berry E.M. (1997) "Dietary fatty acids in the management of diabetes mellitus" **AJCN.**, **66**, **4**, pp 991S-997S.
- 99) Berry P.M. and Spink J.H. (2006) "A physiological analysis of oilseed rape yields: past and future" **J. of. Agric. Sci.**, pp 144, 381.
- 100) Bergmeyer, H.U. (1955). Measurement of catalase activity. **Biochemische Zeitschrift**, pp 327(4), 255.
- 101) Beschorner M. and Odenbach W. (1987) "Fertility of zero-erucic and double low winter rape cultivars in relation to light intensity and genotype" **7th Intern. Rapeseed Congress**, Poznan, Poland, pp 52.
- 102) Bhardwaj J. and Yadav S.K. (2012) "Comparative study on biochemical parameters and antioxidant enzymes in a drought tolerant and a sensitive variety of horsegram (*Macrotyloma uniflorum*) under drought stress" **J. Plant Physiol.**, **7**, **1**, pp 17-29.
- 103) Bilsborrow P. E. and Norton G. (1984) "A Consideration of factors affecting the yield of oilseed rape" **Asp. Appl. Biol.**, **6**, pp 91-99.
- 104) Blum A., & Jordan W. R. (1985) "Breeding crop varieties for stress environments" **CRC Plant Sci.** **2(3)**, pp 199-237.
- 105) Bouchereau A., Clossais-Besnard N., Bensaoud A., Leport L. and Renard A.M. (1996) "Water stress effects on rapeseed quality" **Eur J Agron**, **5**, 1-2, pp 19-30.
- 106) Bouttier C. and D.G. Morgan. (1992) "Development of oilseed rape buds, flowers and pods in vitro" **J. Expl. Bot.**, **43**, **8**, pp 1089-1096.
- 107) Breveden R.E. and Egli D.B. (2003) "Short periods of water stress during seed filing, leaf senescence and yield of soybean" **Crop. Sci.**, **43**, pp 2083-2088.
- 108) Buzza G. (1991) Canola. In RS Jessop, RL Wright, eds New Crops: Agronomy and potential of alternative crop species. **Inkata Press**. Sydney. pp,19.
- 109) Bybordi A. (2014) "Interactive Effects of Silicon and Potassium Nitrate in Improving Salt Tolerance of Wheat" **Integr. Agric.**, **9**, pp 8.
- 110) Bybordi A. (2016) "Effect of zeolite, selenium and silicon on yield, yield components and some physiological traits of canola under salt stress conditions" **IJFCS.**, **14**, **1**.
- 111) Callihan B., Brennan J., Miller T., Brown J. and Moore M. (2000) "Mustards in Mustards, Guide to Identification of Canola, Mustard, Rapeseed and Related Weeds" **uidaho Ag Communications**, Moscow ID.

- 112) Canola Council of Canada (2014) What is Canola? [Online] Available: <http://www.canolacouncil.org/oil-and-meal/what-is-canola/> [2014].
- 113) Cao B., Ma Q., Zhao Q., Wang L. and Xu K. (2015) "Effects of silicon on absorbed light allocation, antioxidant enzymes and ultrastructure of chloroplasts in tomato leaves under simulated drought stress" **Sci. Hortic.**, **194**, pp 53–62.
- 114) Cao B., Wang L., Gao S., Xia J., Xu K. (2017) "Silicon-mediated changes in radial hydraulic conductivity and cell wall stability are involved in silicon-induced drought resistance in tomato" **Protoplasma**. **254**, pp 2295–2304.
- 115) Cárcova J., Maddonni G.A. and Ghera C.M. (1998) "Crop water stress index of three maize hybrids grown in soils with different quality" **Field Crop Res.**, **55**, 1-2, pp 165-174.
- 116) Chance, B., Maehly, A. C. (1955). "Assay of catalases and peroxidases".pp 764-775.
- 117) Colton R.T., Sykes J.D. (1992) Canola (Agfact P5.2.1). **NSW Agriculture.**, pp 1-52.
- 118) Cooke J. and Leishman M.R., (2016) "Consistent alleviation of abiotic stress with silicon addition: a meta-analysis" **Funct. Ecol.**, **30**, 8, pp 1340–1357.
- 119) Cornic G. (2000) "Drought stress inhibits photosynthesis by decreasing stomatal aperture-not by affecting ATP synthesis" **Trends Plant Sci.**, **5**, 5, pp 187-188.
- 120) Costa-Franca M. G., Thi A.T., Pimental C., Pereyra R.O., Zuily- Fodil Y., and Laffray D. (2000) "Differences in growth and water relations among *Phaseolus vulgaris* cultivars in response to induced drought stress" **Environ. Exp. Bot.** **43**, pp 227-237.
- 121) Dalal V.K. and Tripathy B.C. (2012) "Modulation of chlorophyll biosynthesis by water stress in rice seedlings during chloroplast biogenesis" **Plant Cell Environ.**, **35**, 9, pp 1685-1703.
- 122) Darjani A., Rad, A.H.S., Gholipour S. and Haghighat A. (2013) "Investigation the effects of water stress on yield and yield components of canola winter varieties" **Intl J Agron Plant Prod.**, **4**, 3, pp 370-374.
- 123) Datnoff L.E., Snyder G.H. and Korndörfer G.H. (Eds.). (2001) "**Silicon in agriculture**" Studies in Plant Science. Elsevier. pp 403.
- 124) Davies W.J., Kudoyarova G., and Hartung W. (2005) "Long-distance ABA signaling and its relation to other signaling pathways in the detection of soil drying and the mediation of the plant's response to drought" **J. Plant Growth Regul.**, **24**, 4, pp 285.
- 125) De Camargo M. S., Bezerra B. K. L., Vitti A. C., Silva M. A., and Oliveira A. L. (2017) "Silicon fertilization reduces the deleterious effects of water deficit in sugarcane" **J. Soil Sci. Plant Nutr.**, **17**, 1, pp 99-111.

- 126) Debona D., Rodrigues F.A. and Datnoff L. E. (2017) "Silicon's role in abiotic and biotic plant stresses" **Annu. Rev. Phytopathol.**, **55**, pp 85-107.
- 127) Delauney A.J. and Verma D.P.S. (1993) "Proline biosynthesis and osmoregulation in plants" **Plant J.**, **4**, 2, pp 215-223.
- 128) Demirevska K., Simova-Stoilova L., Vassileva V., Vaseva I., Grigorova B. and Feller U. (2008) "Drought-induced leaf protein alterations in sensitive and tolerant wheat varieties" **Gen. Appl. Plant Physiol.**, **34**, 1-2, pp 79-102.
- 129) Diepenbrock W. (2000) "Yield analysis of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.): a review" **Field Crops Res.**, **67**, 1, pp 35-49.
- 130) Dogan E., Copur O., Kahraman A., Kirnak H. and Guldur M.E. (2011) "Supplemental irrigation effect on canola yield components under semiarid climatic conditions" **Agric. Water Manag.**, **98**, 9, pp 1403-1408.
- 131) Duan B., Yang Y., Lu Y., Korpelainen H., Berninger F., Li C., et al. (2007). "Interactions between drought stress, ABA and genotypes in *Picea asperata*" **J. Exp. Bot.**, **58**, pp 3025–3036.
- 132) Dubois M., Gilles K. A., Hamilton J. K., Rebers P. T. and Smith F. (1956) "Colorimetric method for determination of sugars and related substances" **Anal. Chem.**, **28**, 3, pp 350-356.
- 133) Eastham K. and Sweet J. (2002) "Genetically modified organisms (GMOs): The significance of gene flow through pollen transfer" **Copenhagen: EEA.**, pp 1-74.
- 134) Ebrahimiyan M., Majidi M. M., Mirlohi A. and Noroozi A. (2012) "Physiological traits related to drought tolerance in tall fescue" **Euphytica**. **190**, pp 401-414.
- 135) Edwards D., Kerp H., Hass H. (1998) "Stomata in early land plants: an anatomical and ecophysiological approach" **J. Exp. Bot.** **49**, pp 255-278.
- 136) EL Sabagh A., Hossain A., Islam M.S., Barutçular C., Ratnasekera D., Kumar N., ... and da Silva J.A.T. (2019) "Sustainable soybean production and abiotic stress management in saline environments: a critical review" **Aust. J. Crop Sci.**, **13**, 2, pp 228.
- 137) EL Sabagh A., Sorour S., Morsi A., Islam M.S., Ueda A., Barutçular C., Arioglu H. and Saneoka H., (2016) "Role of OSP and compost application in improving water stress tolerance in soybean (*Glycine max* L.)" **Int. J. Curr. Res.**, **8**, 2, pp 25949-25954.
- 138) El Sabagh A., Sorour S., Omar A. E., Islam M. S., Ueda A., Saneoka H. and Barutçular C. (2015) "Soybean (*Glycine Max* L.) Growth Enhancement under Water Stress Conditions" **In International Conference on Chemical, Agricultural and Biological Sciences.**, pp 144-148.

- 139) Emam M.M., Khattab H.E., Helal N.M. and Deraz A.E. (2014) "Effect of selenium and silicon on yield quality of rice plant grown under drought stress" **Aust. J. Crop Sci.**, **8**, **4**, pp 596.
- 140) Eneji AE, Inanaga S, Muranaka S, Li J, Hattori T, An P, Tsuji W. (2008) "Growth and nutrient use in four grasses under drought stress as mediated by silicon fertilizers" **J. of. Plant Nutr.**, **31**, **2**, pp 355–365.
- 141) Enjalbert J.N., Zheng S., Johnson J.J., Mullen J.L., Byrne P.F. and McKay J. K. (2013) "Brassicaceae germplasm diversity for agronomic and seed quality traits under drought stress" **Ind. Crops. Prod.**, **47**, pp 176-185.
- 142) Epstein E. (2001) "Silicon in plants: facts vs. concepts" In *Studies in Plant Science*. Elsevier., **8**, pp. 1-15.
- 143) Epstein E. and Bloom A.J. (2005) "Mineral nutrition of plants: principles and perspectives" 2nd eds. Sunderland, Mass Sinaur, pp 292-305.
- 144) Etesamia H., Jeong B.R., (2018) "Silicon (Si): review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants" **Ecotoxicol Environ Saf.**, **147**, pp 881–896.
- 145) Faize M., Nicola's E., Faize L., Di'az-Vivancos P., Burgos L. and Herna'ndez J. A. (2015) "Cytosolic ascorbate peroxidase and Cu, Zn-superoxide dismutase improve seed germination, plant growth, nutrient uptake and drought tolerance in tobacco" **Theor. Exp. Plant Phys.** **27**, pp 215-226.
- 146) Falk S., Maxwell D.P., Laudenbach D.E. and Huner N.P. (1996) "Photosynthetic adjustment to temperature" In **Photosynthesis and the Environment.**, pp 367-385.
- 147) Fanaei, H.R., Galavi, M., Kafi, M. and Ghanbari Bonjar, A. (2012). Amelioration of water stress by potassium fertilizer in two oilseed species. **Int. J. of. Plant Prod**, **3**, **2**, pp 41-54.
- 148) Fani E., Hassibi P., Meskarbashee M., Khanlou K.M., Seyedahmadi S.A. (2019) "Effect of drought stress and silica spraying on some physiological and functional traits of canola cultivars" **BULG J AGRIC SCI.**, **25**, **1**, pp 62–66.
- 149) Fao-who-codexalimentarius (2015). CODEX STAN 210, Standard for Named Vegetable Oils
- 150) FAOSTAT (Food and Agriculture Organization of the United Nations Statistical Database). (2018) FAOSTAT Production Statistics of Crops. Available: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>.
- 151) Faraji A., Latifi, N., Soltani A. and Rad A.H.S. (2009) "Seed yield and water use efficiency of canola (*Brassica napus* L.) as affected by high temperature stress and supplemental irrigation" **Agric. Water Manag.**, **96**, **1**, pp 132-140.

- 152) Farooq M. A., Detterbeck A., Clemens S., Dietz K.J. (2016) "Silicon-induced reversibility of cadmium toxicity in rice" **J. Exp. Bot.** **67**, pp 3573–3585.
- 153) Farooq M., Hussain M. and Siddique K.H.M. (2014) "Drought stress in wheat during flowering and grain-filling periods" **Crit. Rev. Plant Sci.**, **33**, pp 331–349.
- 154) Farooq M., Wahid A., Kobayashi N., Fujita D.B.S.M.A. and Basra S.M.A. (2009) "Plant drought stress: effects, mechanisms and management" **J SUSTAIN AGR.**, pp 153-188.
- 155) Farquhar G.D. and Sharkey T.D. (1982) "Stomatal conductance and photosynthesis" **Annu. Rev. Plant Physiol.**, **33**, 1, pp 317-345.
- 156) Fathi A., Tari D.B. (2016) "Effect of drought stress and its mechanism in plants" **Int. J. of. Life Sci.**, **10**, 1, pp 1-6.
- 157) Fazeli F., Ghorbanli M. and Niknam V. (2007) "Effect of drought on biomass, protein content, lipid peroxidation and antioxidant enzymes in two sesame cultivars" **Biol Plantarum.**, **51**, 1, pp 98-103.
- 158) Filipek-Mazur B., Tabak M., Gorczyca O. and Lisowska A. (2019) "Effect of sulfur-containing fertilizers on the quantity and quality of spring oilseed rape and winter wheat yield" **J. of. Elem.**, **24**, 4.
- 159) Flakelar C.L., Luckett D.J., Howitt J.A., Doran G. and Prenzler P.D. (2015) "Canola (*Brassica napus*) oil from Australian cultivars shows promising levels of tocopherols and carotenoids, along with good oxidative stability" **J. of. Food Compost Anal.**, **42**, pp 179-186.
- 160) Foyer C.H., Lelandais M. and Kunert K.J. (1994) "Photooxidative stress in plants" **Physiol. Plant.**, **92**, 4, pp 696-717.
- 161) Franks P. J. (2013) "Passive and active stomatal control: either or both?" **NEW PHYTOL** **198**(2), pp 325-327.
- 162) Franks P.J. (2004) "Stomatal control and hydraulic conductance, with special reference to tall trees" **Tree Physiol.**, **24**, 8, pp 865-878.
- 163) Fukao T., Yeung E. and Bailey-Serres J. (2011) "The submergence tolerance regulator SUB1A mediates crosstalk between submergence and drought tolerance in rice" **The Plant Cell.**, **23**, 1, pp 412-427.
- 164) Gao X.P., Zou C.Q., Wang L. and Zhang F. (2004) "Silicon improves water use efficiency in maize plants" **J. Plant Nutr.**, **27**, 8, pp 1457-1470.
- 165) Gao X., Zou C., Wang L. and Zhang F. (2006) "Silicon decreases transpiration rate and conductance from stomata of maize plants" **J. Plant Nutr.** **29**, pp 1637-1647.
- 166) Geiger D., Maierhofer T., AL-Rasheid K.A., Scherzer S., Mumm P., Liese A., ... and Romeis, T. (2011) "Stomatal closure by fast abscisic acid signaling is mediated by

the guard cell anion channel SLAH3 and the receptor RCAR1” **Sci. Signal.**, **4**, **173**, pp **ra32-ra32**.

167) Ghaffari G., Toorchi M., Aharizad S. and Shakiba M.R. (2011) “Evaluation of Traits Related to Water Deficit Stress in Winter Rapeseed Cultivars” **UJERT.**, **1**, **3**.

168) Gharineh M.H. and Karmollachaab A. (2013) “Effect of silicon on physiological characteristics wheat growth under Water-Deficit Stress Induced by PEG” **Intl. J. Agron. Plant. Prod.**, **4**, **7**, pp **1543-1548**.

169) Ghassemi-Golezani K. and Mardfar R.A. (2008) “Effects of limited irrigation on growth and grain yield of common bean” **J. Plant Sci.**, **3**, **3**, pp **230-235**.

170) Ghassemi-Golezani K., Ghanehpour S. and Dabbagh Mohammadi-Nasab A. (2009). “Effects of water limitation on growth and grain filling of faba bean cultivars” **J. FOOD. AGRIC. ENVIRON.** **7**, **3**, pp **442-447**.

171) Ghobadi M., Bakhshandeh M., Fathi G., Gharineh M.H., Alami-Said K., Naderi A., and Ghobadi M.E. (2006) “Short and long periods of water stress during different growth stages of canola (*Brassica napus* L.): effect on yield, yield components, seed oil and protein contents” **J. Agron.**

172) Ghorbanli M., Gafarabad M., Amirkian T.A. and Allahverdi M.B. (2013) “Investigation of proline, total protein, chlorophyll, ascorbate and dehydroascorbate changes under drought stress in Akria and Mobil tomato cultivars” **Iran. J. Plant Physiol.**, **3**, **2**, pp **651- 658**.

173) Gill S.S. and Tuteja N. (2010) “Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants” **PLANT PHYSIOL. BIOCH.**, **48**, pp **909–930**.

174) Gong H.J., Chen K.M., Chen G.C., Wang S.M. and Zhang C.L. (2003) “Effects of silicon on growth of wheat under drought” **J. Plant. Nutri.**, **26**, **5**, pp **1055-1063**.

175) Gong H.J., Chen K.M., Zhao Z.G., Chen G.C. and Zhou W.J. (2008) “Effects of silicon on defense of wheat against oxidative stress under drought at different developmental stages” **J. BIOL. PLANTARUM.**, **52**, **3**, pp **592-596**.

176) Gong H., Zhu, X., Chen K., Wang S. and Zhang C. (2005) “Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought” **Plant Sci.**, **169**, **2**, pp **313-321**.

177) Grant R.F., Jackson B.S., Kiniry J.R. and Arkin G.F. (1989) “Water deficit timing effects on yield components in maize” **Agron. J.**, **81**, **1**, pp **61-65**.

178) Guerfel M., Baccouri O., Boujnah D., Chaïbi W., & Zarrouk M. (2009) “Impacts of water stress on gas exchange, water relations, chlorophyll content and leaf structure in the two main Tunisian olive (*Olea europaea* L.) cultivars” **Sci. Hort.** **119**, **3**, pp **257-263**.

- 179) Gugala M., Sikorska A. and Zarzecka K. (2020) "The Effect of Fertilization with Sulphur, Boron, and Amino Acids on the Content of Glucosinolate in Winter Rape Seeds" **Agron.**, **10**, **4**, pp 519.
- 180) Gugala M., Sikorska A., Zarzecka K., Kapela K. and Mystkowska I. (2017) "The effect of sowing method and biostimulators on autumn development and overwintering of winter rape", **Acta Sci. Pol., Agricultura.**, **16**, **3**, pp 111-120.
- 181) Gulden R.H., Warwick S.I. and Thomas A.G. (2008) "The biology of Canadian weeds. 137. *Brassica napus* L. and *B. rapa* L. Canadian", **J. Plant. Sci.**, **88**, **5**, pp 951-996.
- 182) Gunes A., Pilbeam D. J., Inal A., Bagci E. G., Coban S. (2007) "Influence of silicon on antioxidant mechanisms and lipid peroxidation in chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars under drought stress" **J Plant Interact.** **2**, pp 105–113.
- 183) Gunes A., Pilbeam D.J., Inal A., Coban S. (2008) "Influence of silicon on sunflower cultivars under drought stress, I: growth, antioxidant mechanisms, and lipid peroxidation" **Commun Soil Sci Plant Anal.**, **39**, pp 1885–1903.
- 184) Guo P.G., and Li R.H. (2000) "Effects of high nocturnal temperature on photosynthetic organization in rice leaves" **Acta Botanica Sinica.**, **42**, **7**, pp 673-678.
- 185) Guo Q., Wang Y., Zhang H., Qu G., Wang T., Sun Q. and Liang D. (2017) "Alleviation of adverse effects of drought stress on wheat seed germination using atmospheric dielectric barrier discharge plasma treatment" **Sci. Rep.**, **7**, **1**, pp 1-14.
- 186) Gupta S.N., Dahiya B.S., Malik B.P.S. and Bishnoi N.R. (1995) "Response of chickpea to water deficits and drought stress" **Haryana Agriculture University Journal of Research.**, **25**, **1/2**, pp 11-19.
- 187) Habekotté, B. (1993) "Quantitative analysis of pod formation, seed set and seed filling in winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) under field conditions", **Field Crops Res.**, **35**, **1**, pp 21-33.
- 188) Habibi, G. (2014) "Silicon supplementation improves drought tolerance in canola plants", **Russ. J. Plant Physiol.**, **61**, **6**, pp 784-791.
- 189) Hajiboland R., Cherghvareh L. and Dashtebani F. (2016) "Effect of silicon supplementation on wheat plants under salt stress" **J. Plant Proc. Func.** **5**, pp 1–12.
- 190) Hajiboland R., Cheraghvareh L. and Poschenrieder C. (2017) "Improvement of drought tolerance in tobacco (*Nicotiana rustica* L.) plants by silicon", **J. Plant Nutr.**, **40**, **12**, pp 1661-1676.
- 191) Halkier B. A. and Gershenzon J. (2006) "Biology and biochemistry of glucosinolates" **Annu. Rev. Plant Biol.**, **57**, pp 303-333.
- 192) Hamayun M., Sohn E.Y., Khan S.A., Shinwari Z.K., Khan A.L. and Lee I.J. (2010) "Silicon alleviates the adverse effects of salinity and drought stress on growth

and endogenous plant growth hormones of soybean (*Glycine max* L.)” **Pak. J. Bot.**, **42**, **3**, pp 1713-1722.

193) Hameed A., Sheikh M.A., Jamil A. and Basra S.M.A. (2013) “Seed priming with sodium silicate enhances seed germination and seedling growth in wheat (*Triticum aestivum* L.) under water deficit stress induced by polyethylene glycol” **Pak. j. life soc. Sci.**, **11**, **1**, pp 19-24.

194) Hanafy Ahmed A.H., Harb E.M., Higazy M.A. and Morgan S.H. (2008) “Effect of silicon and boron foliar applications on wheat plants grown under saline soil conditions” **Int. J. Agric Res.**, **3**, **1**, pp 1-26.

195) Harper F. R., & Berkenkamp B. (1975) “Revised growth-stage key for *Brassica campestris* and *B. napus*” **Can. J. Plant Sci.**, **55**, **2**, pp 657-658.

196) Hassanpour H. and Niknam V. (2014) “Effect of water deficit stress on growth and antioxidant enzyme activity of *Mentha pulegium* L. at flowering stage” **J. Plant. Proc.Func.**, **3**, **8**, pp 25-34.

197) Hasanuzzaman M., Nahar K., Anee T.I., Khan M.I.R. and Fujita M. (2018) “Silicon-mediated regulation of antioxidant defense and glyoxalase systems confers drought stress tolerance in *Brassica napus* L.” **S. Afr. J. Bot.**, **115**, pp 50-57.

198) Hashemi A., Abdolzadeh A., Sadeghipour H.R. (2010) “Beneficial effects of silicon nutrition in alleviating salinity stress in hydroponically grown canola, *Brassica napus* L.” plants. **Soil Sci. Plant Nutr.** **56**, pp 244–253.

199) Hattori T., Inanaga S., Hideki A., Ping A., Shigenori M., Miroslava L. and Lux A. (2005) “Application of silicon enhanced drought tolerance in *Sorghum bicolor*” **Physiol Plant.** **123**, pp 459-466.

200) Hodgson A.S. (1978) “Rapeseed adaptation in northern New South Wales. I. Phenological responses to vernalization, temperature and photoperiod by annual and biennial cultivars of *Brassica campestris* L., *Brassica napus* L. and wheat cv. Timgalen” **Aust. J. Agric. Res.**, **29**, **4**, pp 693-710.

201) Hong Bo S., Zong Suo L., & Ming An S. (2006) “Osmotic regulation of 10 wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes at soil water deficits” **Colloids and surfaces B: Biointerfaces.**, **47**, **2**, pp 132-139.

202) Hosseini, M. and Hassibi P. (2011) “Effects of water deficit stress on several quantitative and qualitative characteristics of canola (*Brassica napus* L.) cultivars” **Not. Sci. Biol.**, **3**, **3**, pp 120-125.

203) Hsu S.Y., Hsu Y.T. and Kao C.H. (2003) “The effect of polyethylene glycol on proline accumulation in rice leaves” **Biol. Plant.**, **46**, **1**, pp 73-78.

- 204) Hüsken A. and Dietz-Pfeilstetter A. (2007) "Pollen-mediated intraspecific gene flow from herbicide resistant oilseed rape (*Brassica napus* L.)" **Transgenic Res.**, **16**, 5, pp 557-569.
- 205) Ijaz R., Ejaz J., Gao S., Liu T., Imtiaz M., Ye, Z. and Wang T. (2017) "Overexpression of annexin gene AnnSp2, enhances drought and salt tolerance through modulation of ABA synthesis and scavenging ROS in tomato" **Sci. Rep.**, **7**, 1, pp 1-14.
- 206) Iqbal M., Akhtar N., Zafar S. and Ali I. (2008) "Genotypic responses for yield and seed oil quality of two Brassica species under semi-arid environmental conditions" **S. Afr. J. Bot.**, **74**, 4, pp 567-571.
- 207) Jaleel CA, Manivannan P, Wahid A, Farooq M, Somasundaram R, Panneerselvam R (2009) "Drought stress in plants: a review on morphological characteristics and pigments composition" **Int J Agric Biol.**, **11**, pp 100–105.
- 208) Jaleel, C.A., Gopi, R. and Panneerselvam, R. (2008) "Growth and photosynthetic pigments responses of two varieties of *Catharanthus roseus* to triadimefon treatment, Comptes" **Rendus. Biology.**, **331**, pp 272–277.
- 209) Jamil, M., Rehman, S., Rha, E. S. (2007) "Salinity effect on plant growth, PSII photochemistry and chlorophyll content in sugar beet (*Beta vulgaris* L.) and cabbage (*Brassica oleracea capitata* L.)" **pak. j. bot.**, **39**, pp 753-760.
- 210) Jankowski, K.J.; Sokólski, M.; Szatkowski, A. (2019) "The Effect of Autumn Foliar Fertilization on the Yield and Quality of Winter Oilseed Rape Seeds" **Agronomy.**, **9**, pp 849.
- 211) Jensen, C.R., Mogensen, V.O., Mortensen, G., Fieldsend, J.K., Milford, G.F.J., Anderson, M.N. and Thage, J. H. (1996) "Seed glucosinolate, oil and protein content of field-grown rape (*Brassica napus* L.) affected by soil drying and evaporative demand" **Field Crops Res.**, **47**, pp 93-105.
- 212) Jill, E.C., Ciro, S. and Mateo, V. (2012). "Dissecting maize productivity, ideotypes associated with grain yield under drought stress and well watered conditions" **J. Integr. Plant Biol.** **54**, 12, pp 1007–1020.
- 213) Johari-Pireivatlou, M. (2010) "Effect of soil water stress on yeild and proline content of four wheat lines" **Afr. J. Biotechnol.**, **9**, pp 36-40.
- 214) Jones, H. (1991) "Stomatal control of xylem embolism" **Plant Cell Environ.**, **18**, pp 189-196.
- 215) Jones, H.G. and Tardieu, F. (1998) "Modeling water relations of horticultural crops: a review" **Scientia Horti.**, **74**, 1-2, pp 21-46.
- 216) Jongrunklang, N., Toomsan, B., Vorasoot, N., Jogloy, S., Boote, K.J., Hoogenboom, G. and Patanothai, A. (2013) "Drought tolerance mechanisms for yield

responses to preflowering drought stress of peanut genotypes with different drought tolerant levels” **Field Crops Res**, **144**, pp 34-42.

217) Kalandyk A., Waligórski P. and Dubert F. (2014) “Application of biostimulators in alleviation of effects of drought and other environmental stresses in common soybean (*Glycine max*. L. Merr.)”. **Episteme**, **22**, pp 267-274.

218) Kat. N. and Owa, N. (1990) “dissolution mechanism of silicate slag fertilizers in paddy soils”. in: **international congress of soil science.**, 14. Kyoto., **4**, pp 609-610.

219) Kauseri R.H., Athar U.R. and Ashraf M. (2006) “Chlorophyll fluorescence: A potential indicator for rapid assessment of water stress tolerance in canola” **Pak. J. of Bot.**, **38**, 5, pp 1501–1509.

220) Kaushal M. and Wani S.P. (2016) “Rhizobacterial-plant interactions: strategies ensuring plant growth promotion under drought and salinity stress” **Agri, Eco and Env.**, **231**, pp 68–78.

221) Kaya C., Tuna L. and Higgs D. (2006) “Effect of silicon on plant growth and mineral nutrition of maize grown under water stress condition” **J. of. Plant Nutr.**, **29**, pp 1469-1480.

222) Kendall E.J, Murnaghan B.D, Jonesand J. and Bowley S.R. (2000) “Iron superoxide dismutase expression in transgenic alfalfa increase winter survival without a detectable increase in photosynthetic oxidative stress tolerance” *Plant Physiol.*, **22**, pp 1427-1836.

223) Keshavarz H., Modarres-Sanavy S.A.M. and Mahdipour Afra M. (2018) “Organic and chemical fertilizer affected yield and essential oil of two mint species” **J. Essent. Oil-Bear. Plants.**, **21**, 6, pp 1674-1681.

224) Keshavarz H., Sanavy S.A.M.M. and Moghadam R.S.G. (2016) “Impact of foliar application with salicylic acid on biochemical characters of canola plants under cold stress condition” **Not. Sci. Biol.**, **8**, 1, pp 98-105.

225) Khakwani A.A., Dennett M.D., Munir M. and Abid, M. (2012) “Growth and yield response of wheat varieties to water stress at booting and anthesis stages of development” **Pak. J. of. Bot.**, **44**, 3, pp 879-886.

226) Kim Y.H., Khan A.L., Shinwari Z.K., Kim D.H., Waqas M. and 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” **Pak. J. of. Bot.**, **44**, pp 891-897.

227) Kim Y.H., Khan A.L., Waqas M. and Lee I.J. (2017) “Silicon regulates antioxidant activities of crop plants under abiotic-induced oxidative stress: a review” **Frontiers in Plant Science.**, **8**, pp 510.

- 228) Kim Y.H., Khan A.L., Waqas M., Shim J.K., Kim D.H., et al. (2014) "Silicon application to rice root zone influenced the phytohormonal and antioxidant responses under salinity stress" **J. Plant Growth Regul.**, **33**, pp 137–49.
- 229) Kirkegaard J.A., Sprague S.J., Dove H., Kelman W.M., Marcroft S.J., Lieschke A., Howe G.N. and Graham J.M. (2008) "Dual-purpose canola-A new opportunity in mixed farming systems" **J. Austr. of Agri. Res.**, **59**, pp 291-302.
- 230) Konuskan D. B., Arslan M. and Oksuz A. (2019) "Physicochemical properties of cold pressed sunflower, peanut, rapeseed, mustard and olive oils grown in the Eastern Mediterranean region" **Saudi J. Biol. Sci.**, **26**(2), pp 340-344.
- 231) Koret L.L., Williams J.H., Specht J.E. and Sorenson R.C. (1983) "Irrigation of soybean genotypes during reproductive ontogeny" II. Yield components responses. **Crop Sci.**, **23**, pp 528- 533.
- 232) Korndorfer G.K. and Lepsch I. (2001) "Effect of silicon on plant growth and crop yield. (eds L.E. Datnoff, G.H. Snyder & G.H. Korndorfer). **Elsevier.**, pp 133-147.
- 233) Kottmann L., Wilde P. and Schittenmhelm S. (2016) "How do timing, duration, and intensity of drought stress affect the agronomic performance of winter rye?" **Euro J. of. Agro.**, **75**, pp 25-32.
- 234) Kumar A. and Singh D.P. (1998) "Use of physiological indices as screening technique for drought tolerance in oil seed Brassica species" **Ann. Bot.**, **81**, pp 413-420.
- 235) Kusvuran S. (2011) "Effects of drought and salt stresses on growth, stomatal conductance, leaf water and osmotic potentials of melon genotypes (*Cucumis melo* L.). **Afr. J. of. Agri. Res.**, **7**, pp 775-781.
- 236) Kuszczewicz B., Bartoszek A., Wolska L., Drzewiecki J., Gorinstein S., and Namiesnik J. (2008) "Partial characterization of white cabbages (*Brassica oleracea* var. capitata f. alba) from different regions by glucosinolates, bioactive compounds, total antioxidant activities and protiens" **LWT – Food Sci and Technol.**, **41**, pp 1–9.
- 237) Kutschera U., Niklas K.J.(2018) "Julius Sachs (1868): The father of plant physiology" **American J. of. Bot.**, **105**, pp 656–666.
- 238) Lee S., Sohn E., Hamayun M., Yoon J. and Lee I. (2010) "Effect of silicon on growth and salinity stress of soybean plant grown under hydroponic system" **Agroforest Syst.**, **80**, pp 333-340.
- 239) Légère A. (2005) "Risks and consequences of gene flow from herbicide-resistant crops: canola (*Brassica napus* L.) as a case study" **Pest Manage Sci.**, **61**, pp 292-300.
- 240) Legere A., Simard M.J., Thomas A.G., Pageau D., Lajeunesse J., Warwick S.I., Derksen D.A. 92001) "Presence and persistence of volunteer canola in Canadian cropping systems" **The British Crop Protection Council Conference – Weeds.**, pp 143-148.

- 241) Lehmann S., Funck D., Szabados L. and Rentsch D. (2010) "Proline metabolism and transport in plant development" **Amino acids**. **39**(4), pp 949-962.
- 242) Lewin J., Reimann B.E.F. (1969) "Silicon and plant growth" **Annu. Rev. Plant Physiol.**, **20**, pp 289–304.
- 243) Liang Y., Chen Q., Liu Q., Zhang W. and Ding R. (2003) "Exogenous silicon (Si) increases antioxidant enzyme activity and reduces lipid peroxidation in roots of salt stressed barely (*Hordeum vulgare* L.)" **J. Plant Physiol.** **160**, pp 1157-1164.
- 244) Liang Y. C., Sun W. C., Zhu Y. G. and Christie P. (2007) "Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants" A review. **Environ. Pollut.** **147**(2), pp 422- 428.
- 245) Liang Y., Zhang W., Chen Q. and Ding, R. (2005) "Effects of silicon on H<sup>+</sup>-ATPase and H<sup>+</sup>-PPase activity, fatty acid composition and fluidity of tonoplast vesicles from roots of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.). **Environ. Exp. Bot.** **53**(1), pp 29-37.
- 246) Lilley J.M. and Fukai S. (1994) "Effects of timing and severity of water deficit on four diverse rice cultivars III. Phenological development, crop growth and grain yield" **Field Crop Res.**, **37**, pp 225-234.
- 247) Lin L., Allemekinders H., Dansby A., Campbell L., Durance-Tod S., Berger A., and Jones P.J.H. (2013) "Evidence of health benefits of canola oil" **Nutr. Rev.** **71**:370–385.
- 248) Li-Ping B. A. I., Fang-Gong S. U. I., Ti-Da G. E., Zhao-Hui S. U. N., Yin-Yan L. U., and Guang-Sheng Z. H. O. U. (2006) "Effect of soil drought stress on leaf water status, membrane permeability and enzymatic antioxidant system of maize" **Pedosphere**, **16**(3), pp 326-332.
- 249) Liu D., Pei Z.F., Naeem M.S., Ming D.F., Liu H.B., Khan F. and Zhou J.W. (2011) "5- Aminolevulinic acid activates antioxidative defence system and seedling growth in *Brassica napus* L. under water-deficit stress" **J Agron Crop Sci.**, **197**, pp 284–295.
- 250) Liu F., Jensen R. and Andersen N. (2004) "Drought stress effect on carbohydrate concentration in soybean leaves and pods during early reproductive development: its implication in altering pod set" **Field Crops Res.**, **86**, pp 1-13.
- 251) Lotfi R., Pessarakli M., Gharavi-Kouchebagh P. and Khoshvaghti H. (2015) "Physiological responses of *Brassica napus* to fulvic acid under water stress: Chlorophyll a fluorescence and antioxidant enzyme activity" **The Crop J.**, **3**, pp 434–439.
- 252) Luan S. (2002) "Signalling drought in guard cells" **Plant Cell Environ.**, **25**, pp 229–237.

- 253) Lugoian C. and Ciulca S. (2011) "Evaluation of relative water content in winter wheat" **J. Hortic. Fores. Biotechnol.**, 15, pp 173–177.
- 254) Ma Q, Bhaboudian M.H, Turner N.C. and Palta, J.A. (2001a) "Gas exchange by pods and subtending leaves and internal recycling of CO<sub>2</sub> by pods of chickpea (*Cicer arietinum*. L) subjected to water deficits" **J. Exp. Bot.**, 52, pp 123-131.
- 255) Ma C.C., Li Q.F., Gao Y.B. and Xin T.R. (2004) "Effects of silicon application on drought resistance of cucumber plants" **J. Soil Sci. Plant Nutr.**, 50, pp 623-632.
- 256) 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" **J. Plant Growth Regul.**, 35, pp 1–10.
- 257) Ma J.F., Goto S., Tamai K. and Ichii M. (2001b) "Role of root hairs and lateral roots in silicon uptake by rice" **Plant Physiol.**, 127, pp 1773–1780.
- 258) Ma J.F. and Takahashi, E. (2002) "Soil, Fertilizer, and Plant Silicon Research in Japan." **Elsevier**, Amsterdam.
- 259) Ma J.F. and Yamaji N. (2006) "Silicon uptake and accumulation in higher plants" **Trends Plant Sci.**, 11, pp 392-397.
- 260) Ma J.F. and Yamaji, N. (2008) "Functions and transport of silicon in plants" **Cell. Mol. Life Sci.**, 65, pp 3049-3057.
- 261) Ma Q., Niknam S.R. and Turner D. (2006) "Response of osmotic adjustment and seed yield of *Brassica napus* and *Brassica juncea* to soil water deficit at different growth stages" **Aust. J. Agric. Res.**, 57, pp 221-226.
- 262) Mag T.K. (1983) "Canola oil processing in Canada" **J. Am. Oil Chem. Soc.**, 60, pp 380–384.
- 263) Maghsoudi K., Emam Y. and Pessarakli M. (2016) "Effect of silicon on photosynthetic gas exchange, photosynthetic pigments, cell membrane stability and relative water content of different wheat cultivars under drought stress conditions" **J. Plant Nutr.**, 39, pp 1001–1015.
- 264) Mahdavi B., Modarres Sanavy S.A.M. Aghaalikhani M., Sharifi M. and Dolatabadian A. (2011) "Chitosan improves osmotic potential tolerance in safflower (*Carthamus tinctorius* L.) seedlings" **J. of. Crop Improv.**, 25, 6, pp 728-741.
- 265) Maleki A., Naderi A., Naseri R., Fathi A., Bahamin S. and Maleki R. (2013) "Physiological Performance of Soybean Cultivars under Drought Stress" **BEPLS**. 2, 6, pp 38-44.
- 266) Manivannan P., Jaleel C.A., Kishorekumay A., Sankar B., Somasundaram R., Sridharan R. and Panneerselvam R. (2007) "Drought stress induced changes in the biochemical parameters and photosynthetic pigments of cotton (*Gossypium hirsutum* L.)" **Indian J. App. Pure Bio.**, 22, pp 369-372.

- 267) Marafon A.C. and Endres L. (2013) "Silicon: fertilization and nutrition in higher plants" **Embrapa Tabuleiros Costeiros-Artigo em periódico indexado (ALICE)**.
- 268) Martinez-Ballesta M.D.C., Moreno D.A. and Carvajal M. (2013) "The physiological importance of glucosinolates on plant response to abiotic stress in Brassica" **Int. J. Mol. Sci.**, **14**, pp 11607–11625.
- 269) McVetty P.B. and Duncan R.W. (2015) "Canola, rapeseed, and mustard: for biofuels and Bioproducts" In VMV Cruz, DA Dierig, (eds), Industrial Crops. Handbook of Plant Breeding, Vol 9. **Springer**, NY, pp 133-156.
- 270) Meinzer F.C. (2002) "Co-ordination of vapour and liquid phase water transport properties in plants" **Plant Cell. Env.** **25**, pp 265–274.
- 271) Merwad A.R.M.A., Desoky E.S.M. and Rady M.M. (2018) "Response of water deficit-stressed *Vigna unguiculata* performances to silicon, proline or methionine foliar application" **Sci Horti.**, **228**, pp 132–144.
- 272) Micheletto S., Rodriguez-Urbe L., Hernandez R., Richins R.D., Curry J., and O'Connell M.A. (2007) "Comparative transcript profiling in roots of *Phaseolus acutifolius* and *P. vulgaris* under water deficit stress" **Plant Sci.**, **173**, 5, pp 510-520.
- 273) Ming D.F., Pei Z.F., Naeem M.S., Gong H.J., Zhou W.J. (2012) "Silicon alleviates PEG-induced water-deficit stress in upland rice seedlings by enhancing osmotic adjustment" **J. Agron. Crop Sci.** **198**, pp 14–26.
- 274) Miri H.R. (2007) "Morpho-physiological basis of variation in rapeseed (*Brassica napus* L.) yield" **Int J Agric Biol.**, **9**, 6, pp 845–850.
- 275) Mitani N., Ma J.F. and Iwashita T. (2005) "Identification of the silicon form in xylem sap of rice (*Oryza sativa* L.)" **Plant Cell Physiol.**, **46**, pp 279–283.
- 276) Mitani N., Yamaji N., Ago Y., Iwasaki K. and Ma J.F. (2011) "Isolation and functional characterization of an influx silicon transporter in two pumpkin cultivars contrasting in silicon accumulation" **The Plant J.**, **66**, pp 231–240.
- 277) Moghadam H.R.T, Zahedi H., Ghooshchi F. (2011) "Oil quality of canola cultivars in response to water stress and super absorbent polymer application" **Pesq Agropec Trop.** **41**, pp 579-586.
- 278) Mohammad F. and Naseem U. (2006) "Effect of K application on leaf carbonic anhydrase and nitrate reductase activities, photosynthetic characteristics, NPK and NO<sub>3</sub> contents, growth, and yield of mustard" **Photosynthetica.**, **44**, 3, pp 471-473.
- 279) Mohammadkhan N. and Heidari R. (2008) "Drought-induced accumulation of soluble sugars and proline in two maize varieties" **World Appl. Sci. J.**, **3**, pp 448-453.
- 280) Molazem D., Azimi J., Ghasemi M., Hanifi M. and Khatami A. (2013) "Correlation analysis in different planting dates and plant density of canola (*Brassica napus* L.) varieties in Astara Region" **Life Sci.** **10(1)**, pp 26-31.

- 281) Moradshahi A., Salehi Eskandari B. And Kholdebarin B. (2004) "Some physiological responses of canola (*Brassica napus* L.) to water defficit stress under laboratory conditions" **Iran. J. Sci. Technol.**, 28, pp 43-50.
- 282) Morgan D.G. (1982) "The regulation of yield components in oilseed rape (*Brassica napus* L.)" **J. Sci. Food Agric.**, 33, pp 1266-1268.
- 283) Moro A.L., Broetto F., Moro E. (2015) "Antioxidative responses, physiological and productive of rice grown under water deficit and silicon fertilization" **Semina: Ciências Agrárias.**, 36, pp 3013-3028.
- 284) Morrison M.J., Mcvetty P.B. and Shaykewick E.J. (1989) "The determination and vertification of abaseline temperature for the growth of westar summer rape" **Can. J. Plant Sci.**, 69, pp 455-465.
- 285) Mostajeran A. and Rahimi-Eichi V. (2009) "Effects of drought stress on growth and yeild of rice (*Oryza sativa* L.) cultivars and accumulation of proline and soluble sugars in sheath and blades of their different ages leaves" **Am Eurasian J Agric Environ Sci.**, 5, pp 264-272.
- 286) Muhammad N., Cheema M.A., Wahid M.A., Ahmad N. and Zaman M. (2007) "Effect of source and method of nitrogen fertilizer application on seed yield and quality of canola (*Brassica napus* L.)" **Pak. J. Agri. Sci.**, 44, pp 74-78.
- 287) Nachtiagall G.R., Vahl L.C., Pauletto E.A. and Turatti A.L. (1990) "Expanded vermiculite and soil moisture in development of rape in green house conditions" **REV BRAS CIENC SOLO.**, 14, 3, pp 363-367.
- 288) Naderikharaji R., pakniyat H., and Biabani A.R. (2008) "Effect of Drought stress on photosynthetic rate of four Rapeseed (*Brassica napus*) Cultivars" **J. of Applied sciences.** 23, pp 4460-4463.
- 289) Narimani H., Rahimi M.M., Ahmadikhah A. and Vaezi B. (2010) "Study on the effects of foliar spray of micronutrient on yield and yield components of durum wheat" **Arch. Appl. Sci. Res.**, 2, pp 168-176.
- 290) Nasri M., Zahedi H. and Tohidi Moghadam H.R. (2008) "Investigation of Water Stress on macro elements in Rapeseed genotypes Leaf (*Brassica napus*)" **Ameri. J. of Agric and Bio Sci.**, 3, 4, pp 669-672.
- 291) Neethirajan S., Gordon R. and Wang L. (2009) "Potential of silica bodies (phytoliths) for nanotechnology" **Trends Biotechnol.**, 27, pp 461-467.
- 292) Nielsen D.C. and Nelsen N.O. (1998) "Black bean sensitivity to water stress at various growth stages" **Crop Sci.**, 38, pp 422-427.
- 293) Nolla A., Faria R.J., Korndorfer G.H., Silva T.R.B. (2012) "Effect of silicon on drought tolerance of upland rice" **J FOOD AGRIC ENVIRON.**, 10, pp 269-272.

- 294) Noman A., Ali S., Naheed, F., Ali Q., Farid M., Rizwan M. et al. (2015) "Foliar application of ascorbate enhances the physiological and biochemical attributes of maize (*Zea mays* L.) cultivars under drought stress" **Arch. Agron. Soil Sci.**, **61**, pp 1659–1672.
- 295) Norton G., Bilsborrow P.E. and Shipway P.A. (1991) "Comparative physiology of divergent types of winter rapeseed" **Organizing Committee**, Saskatoon. pp 578-582.
- 296) Norton R., Kirkegaard J., Angus J. and Potter T. (1999) "Canola in rotations" In P.A Salisbury, T.D Potter, G.Mc Donald, A.G Green. **Eds Canola in Australia: The first thirty years.** pp 23-28.
- 297) OECD. (2012) "Organisation for Economic Cooperation and Development. Consensus document on the biology of the brassica crops (*Brassica* spp.)" Series on Harmonisation of Regulatory oversight of Biotechnology, No 54, **OECD**, Paris., pp 142.
- 298) 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., pp 90-92.
- 299) Ongom P.O., Volenec J.J. and Ejeta G. (2016) "Selection for drought tolerance in sorghum using desiccants to simulate post-anthesis drought stress" **Field Crops Res.**, **198**, pp 213-321.
- 300) Ouzounidou G., Giannakoula A., Ilias I. and Zamanidis P. (2016) "Alleviation of drought and salinity stresses on growth, physiology, biochemistry and quality of two *Cucumis sativus* L. cultivars by Si application" **Rev. Bras. Bot.**, **39**, pp 531–539.
- 301) Ozer H. and Oral E. (1997) "Phenological and yield characteristics of some rape (*Brassica napus* L.) Cultivars grown at Erzurum" **J.Agric. Forest.**, **21**, 3, pp 319-325.
- 302) Pandey R.K., Maranville J.W. and Admou A. (2001) "Tropical wheat response to irrigation and nitrogen in a Sahelian environment. I. Grain yield, yield components and water use efficiency" **Eur J Agron.**, **15**, 3, pp 91-105.
- 303) Parida A.K., Dagaonkar V.S., Phalak M.S. and 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 Physiol. Plant.**, **30**, pp 619-627.
- 304) Pasban Eslam B. (2009) "Evaluation of physiological indices, yield and its components as screening techniques for water deficit tolerance in oilseed rape cultivars" **J AGR SCI TECH.**, **11**, pp 413-422.
- 305) Pasban Eslam B., Shakiba M.R., Neyshabouri M.R., Moghaddam M., Ahmadi M.R. (2000) "Evaluation of physiological indices as a screening technique for drought resistance in oilseed rape" **Proc. Pakistan. Acad. Sci.** **37**, pp 143-152.

- 306) Pei Z.F., Ming D.F., Liu D., Wan G.L., Geng X.X., Gong H.J. et al. (2010) "Silicon improves the tolerance to water-deficit stress induced by polyethylene glycol in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings" **J. Plant Growth Regul.** **29**, pp 106–115.
- 307) Pereira T. S., da Silva Lobato A. K., Tan D. K. Y., da Costa D. V., Uchôa E. B., do Nascimento Ferreira R., dos Santos Pereira E., Ávila F.W., Marques D.J., Guedes E. M. S. (2013) "Positive interference of silicon on water relations, nitrogen metabolism, and osmotic adjustment in two pepper (*Capsicum annuum*) cultivars under water deficit" **Aust. J. Crop Sci.** **7**, pp 1064.
- 308) Pilon C., Soratto R.P., Broetto F. and Fernandes A.M. (2014) "Foliar or soil applications of silicon alleviate water-deficit stress of potato plants" **J. Agron.**, **106**, pp 2325–2334.
- 309) Pirdashti H., Tahmasebi Sarvestani Z. and Bahmanyar M.A. (2009) "Comparison of physiological response among four contrast rice cultivars under drought stress conditions" **World Acad Sci Eng Technol.**, **49**, pp 52-53.
- 310) Polanco L. R., Rodrigues F. A., Nascimento K. J., Cruz M. F., Curvelo C. R., DaMatta F. M. and Vale F. X. (2014) "Photosynthetic gas exchange and antioxidative system in common bean plants infected by *Colletotrichum lindemuthianum* and supplied with silicon" **Trop Plant Pathol.** **39**(1), pp 35-42.
- 311) Poormohammad Kiani S., Grieu P., Maury P., Hewezi T., Gentzbittel L. and Sarrafi A. (2007) "Genetic variability for physiological traits under drought condition and differential expression of water stress-associated genes in sunflower (*Helianthus annuus* L.)" **Theor Appl Genet.** **114**, pp 193-207.
- 312) Prevolnik M., Škrlep M., Janeš L., Velikonja-Bolta S., Škorjanc D. and Čandek-Potokar M. (2011) "Accuracy of near infrared spectroscopy for prediction of chemical composition, salt content and free amino acids in dry-cured ham" **Meat Sci.**, **88**, pp 299–304.
- 313) Przybylski R. (2011) "Canola/rapeseed oil" In *Vegetable Oils in Food Technology: Composition, Properties and Uses*; Gunstone, F.D., Ed.; Blackwell Publishing: **Oxford**, UK., pp 107–136.
- 314) Pulz A.L., Crusciol C.A.C., Lemos L.B. and Soratto R.P. (2008) "Silicate and limestone effects on potato nutrition, yield and quality under drought stress" **Rev Bras Ciênc Solo.**, **32**, pp 1651–1659.
- 315) Rains D.W. (1989) "10 Plant tissue and protoplast culture: applications to stress physiology and. Plants Under Stress" **Biochemistry, Physiology and Ecology and Their Application to Plant Improvement.**, **39**, pp 181.
- 316) Rajabi M., Fetri M., Ghobadi M.E., Faraji M.H. and Asadian, GH. (2013) "Foliar application of Zn and Mn fertilizers on yield and yield components of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) cultivars" **Intl J Agri Crop Sci.**, **5**, pp 718-822.

- 317) Rakow G. (1978) "Zur Formulierung von Zuchtzielen für Erbsen" **Fat Sci Technol.**, 80, pp 93-99.
- 318) Ranjbarfordoei A., Samson R., Damne P.V. and Lemeur R. (2000) "Effects of drought stress induced by polyethylene glycol on pigment content and photosynthetic gas exchange of *Pistacia khinjuk* and *P. mutica*" **Photosynthetica**. 38, 3, pp 443–447.
- 319) Rao G. and Mendham N.J. (1991) "Comparison of chinoli (*B. campestris*) and *B. napus* oilseed rape using different growth regulators, plant population densities and irrigation treatments" **J. Agric. Sci.**, 117, pp 177-187.
- 320) Rashidi S., Shirani Rad A.H., Ayene Band A., Javidfar F. and Lak S. (2012) "Study of relationship between drought stresses tolerances with some physiological parameters in canola genotypes (*B. napus* L.)" **Ann. Biol. Res.**, 3, pp 564–569.
- 321) Ratajczak K., Sulewska H. and Szymańska G. (2017) "New winter oilseed rape varieties Seed quality and morphological traits depending on sowing date and rate" **Plant Prod. Sci.**, 20, pp 262–272.
- 322) Rathke G.W., Christen O. and Diepenbrock W. (2005) "Effects of nitrogen source and rate on productivity and quality of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) grown in different crop rotations" **Field Crops Res.** 94, pp 103-113.
- 323) Ratnakumar P., Deokate P.P., Rane J., Jain N., Kumar V., Berghe D.V. et al. (2016) "Effect of ortho-silicic acid exogenous application on wheat (*Triticum aestivum* L.) under drought" **J. Func Environ. Bot.**, 6, pp 34–42.
- 324) Raven J.A. (2002) "Selection pressures on stomatal evolution" **New Phytol.**, 153, pp 371-386.
- 325) Raven J.A. (2001) "Silicon Transport at the Cell and Tissue Level" In: Datnoff, L. E. et al. (eds.) Studies in Plant Science. **Elsevier**, Amsterdam, pp 41–55.
- 326) Razak A.A., Ismail M.R., Karim M.F., Wahab P.E.M., Abdullah S.N., Kausar H. (2013) "Changes in leaf gas exchange, biochemical properties, growth and yield of chilli grown under soilless culture subjected to deficit fertigation" **Aust. J. Crop. Sci.**, 7, pp 1582–1589.
- 327) Reddy A. R., Chaitanya K. V. and Vivekanandan M. (2004) "Drought-induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants" **J. Plant Physiol.** 161, 11, pp 1189-1202.
- 328) Redovnikovic I.R., Glivetic T., Delonga K. and Vorkapic-Furac, J. (2008) "Glucosinolates and their potential role in plant" **PERIOD BIOL.**, 110, pp 297–309.
- 329) Rehman B. (2016) "Silicon elicited varied physiological and biochemical responses in Indian mustard (*Brassica juncea*): a concentration dependent study" **ISR J PLANT SCI**, 63, 3, pp 158-166.

- 330) Richards R.A. and Thurling N. (1978) "Variation between and within species of rapeseed (*Brassica campestris* and *Brassica napus*) in response to drought stress. I. Sensitivity at different stages of development" **Aust. J. Agric. Res.**, 29, pp 469-477.
- 331) Rizwan M., Ali S., Abbas T., Adrees M., Zia-ur-Rehman M., Ibrahim M. et al. (2018) "Residual effects of biochar on growth, photosynthesis and cadmium uptake in rice (*Oryza sativa* L.) under Cd stress with different water conditions" **J. Environ. Manage.** 206, pp 676–683.
- 332) Robertson M.J. and Holland J.F. (2004) "Production risk of canola in the semi-arid subtropics of Australia" **Crop Pasture Sci.**, 55, 5, pp 525-538.
- 333) 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. pp 142-139.
- 334) Sadras V.O., Connor D.J. and Whitfield D.M. (1993) "Yield, yield components and sourcesink relationships in water-stressed sunflower" **Field Crops Res.**, 31, 1-2, pp 27-39.
- 335) Saleh J. and Najafi N. (2011) "Silicon role in the plant" **Zeitoon J.**, 31, 217, pp 8-16.
- 336) Sana M., Ali A., Malik M.A., Saleem M.F. and Rafiq M. (2003) "Comparative yield potential and oil content of different canola cultivars (*Brassica napus* L.)" **Pak. J. Agric. Sci.**, 2, 1, pp 1-7.
- 337) Sangtarash M.H., Qaderi M.M., Chinnappa C.C., Reid D.M. (2009) "Differential sensitivity of canola (*Brassica napus*) seedlings to ultraviolet-B radiation, water stress and abscisic acid" **Environ. Exp.** 2, pp 212-219.
- 338) Sarker B.C., Hara M. and Uemura M. (2005) "Proline synthesis, physiological responses and biomass yield of eggplants during and after repetitive soil moisture stress" **Hortic. Sci.**, 103,4, pp 387-402.
- 339) 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 Res. Commun.**, 45, pp 202–213.
- 340) Saud S., Li X., Chen Y., Zhang L., Fahad S., Hussain S. et al. (2014) "Silicon application increases drought tolerance of Kentucky bluegrass by improving plant water relations and morphophysiological functions" **Sci. World J.**
- 341) Savant N.K., Korndörfer G.H., Datnoff L.E., Snyder G.H. (1999) "Silicon nutrition and sugarcane production: a review" **J. Plant Nutr.**, 22, pp 1853–1903.

- 342) Schreiner M., Beyene B., Krumbein A. and Stutzel H. (2009) "Ontogenetic changes of 2-propenyl and 3-indolylmethyl glucosinolates in *Brassica carinata* leaves as affected by water supply" **J. Agric. Food Chem.**, **57**, pp 7259–7263.
- 343) Schutte F. (1982) "Development code of oilseed rape" **Plant physiol.**, **27**, 7, pp 128-135.
- 344) Shahsavari N. (2019) "Effects of zeolite and zinc on quality of canola (*Brassica napus* L.) under late season drought stress" **Commun Soil Sci Plant Anal.**, **50**, 9, pp 1117-1122.
- 345) Shahsavari N. and Dadrasnia A. (2016) "Effect of zeolite and zinc on the physiological characteristics of canola under late-season drought stress" **Commun Soil Sci Plant Anal.**, **47**, 18, pp 2077–87.
- 346) Shahsavari N., Jais H.M., and Shirani Rad A.H. (2014) "Effect of zeolite and zinc on the biochemical characteristics of canola upon drought stress" **Sains Malays.**, **43**, 10, pp 1549–55.
- 347) Sharief, A.E. and Keshta M.M. (2006) "Influence of sowing date and plant density on growth and yield of canola (*Brassica napus*, L) under salt affected soils in Egypt" **SJKFU.**, **3**, 1, pp 65-78.
- 348) Sharma K.D. and Kuhad M.S. (2006) "Influence of Potassium level and soil moisture regime on biochemical metabolites of Brassica Species" **Brassica J.**, **8**, pp 71-74.
- 349) Sharma P. and Dubey R.S. (2005) "Drought Induces Oxidative Stress and Enhances the Activities of Antioxidant Enzymes in Growing Rice Seedlings" **Plant Growth Regul.**, **46**, pp 209–221.
- 350) Shawon R.A., Kang B.S., Lee S.G., Kim S.K., Lee H.J., Katrich E., ... and Ku Y.G. (2020) "Influence of drought stress on bioactive compounds, antioxidant enzymes and glucosinolate contents of Chinese cabbage (*Brassica rapa*)" **Food chemi.**, **308**, pp 125657.
- 351) Shen X., Zhou Y., Duan L., Li Z., Eneji A.E. and Li J. (2010) "Silicon effects on photosynthesis and antioxidant parameters of soybean seedlings under drought and ultraviolet-B radiation" **J. Plant Physiol.**, **167**, pp 1248–1252
- 352) Shi C.H., Xu W.D., Yu Q.R., Zhang H.Z., Yang Z.W. and Wu J.G. (2011) "Impacts of erucic acid and glucosinolate content on genetic relationships between protein content and fatty acids of rape seed across environments" **Euphytica.**, **180**, pp 337-346.
- 353) Shi Y., Zhang Y., Yao H., Wu J., Sun H. and Gong H. (2014) "Silicon improves seed germination and alleviates oxidative stress of bud seedlings in tomato under water deficit stress" **Plant Physiol. Biochem.**, **78**, pp 27–36.

- 354) Shirani Rad A.H., Abbasian A. and Aminpanah H. (2013) "Evaluation of rapeseed (*Brassica napus* L.) cultivars for resistance against water deficit stress" **Bulg. J. Agric. Sci.**, **19**, 2, pp 266-273.
- 355) Shirani Rad A.H. and Zandi P. (2014) "Agronomic evaluation of rapeseed varieties (*Brassica napus* L.) in response to late-season water deficit stress" **Agric. Conspec.**, **79**, 3, pp 157-169.
- 356) Shirani Rad A.H. and Zandi P. (2012) "The effect of drought stress on qualitative and quantitative traits of spring rapeseed (*Brassica napus* L.) cultivars" **Zemdirbyste.**, **99**, pp 47-54.
- 357) Shrestha R., Turner N.C., Siddique K.H.M., Turner D.W. and Speijers, J. (2006) "A water deficit during pod development in lentils reduces flower and pod number but not pod size" **Aust. J. of Agric. Res.**, **57**, 4, pp 427-438.
- 358) Siddique M.R.B., Hamid A. and Islam M.S. (2000) "Drought stress effects on water relations of wheat" **Bot Bull Acad Sci**, **41**, pp 35-39.
- 359) Sinaki J.M., Majidi Heravan E., Shirani Rad A.H., Noormohamadi G. and Zarei G. (2007) "The effects of water deficit during growth stages of canola (*B. napus* L.)" **Am Eurasian J Agric Environ Sci**, **2**, pp 417-422.
- 360) Singh M., Chauhan J. S. and Meena S. S. (2009) "Drought induced changes in water use efficiency and other morpho- physiological characters in Indian mustard (*Brassica juncea* L.)" **J. Soil Sci. Plant Nutr.** **39**, pp 205–12.
- 361) Sirin Vasa A. and Morgan, D.G. (1996) "Growth and development of pod wall in spring rapeseed (*Brassica napus* L.) as related to the presence of seeds and exogenous phytohormones" **J. Agric. Sci.** **127**, pp 487-500.
- 362) Slama I., Ghnaya T., Hessini K., Messedi D., Saviouré A. and Abdelly C. (2007) "Comparative study of the effects of mannitol and PEG osmotic stress on growth and solute accumulation in *Sesuvium portulacastrum*" **Environ. Exp. Bot.** **61**(1), pp 10-17.
- 363) Smirnoff, N. (1993) "The role of active oxygen in the response of plants to water deficit and desiccation" **New Phytol.** **125**, pp 27–58.
- 364) Sofo A., Dichio B., Xiloyannis C. and Masia A. (2005) "Antioxidant defences in olive trees during drought stress: changes in activity of some antioxidant enzymes" **J. of. funct plant biol**, **32**(1), pp 45-53.
- 365) Sonobe K., Hattori T., An P., Tsuji W., Eneji A.E., Kobayashi S., Kawamura Y., Tanaka K. and Inanaga S. (2010) "Effect of silicon application on sorghum root responses to water stress" **J. Plant Nutr.** **34**, pp 71–82.
- 366) Spaeth S.C., Randall H.C., Sinclair T.R. and Vendeland J.S. (1984) "Stability of soybean harvest index" **Agron.** **76**, pp 482-486.

- 367) Srivalli S., and Khanna-Chopra R. (2009) "Delayed wheat flag leaf senescence due to removal of spikelets is associated with increased activities of leaf antioxidant enzymes, reduced glutathione/oxidized glutathione ratio and oxidative damage to mitochondrial proteins" **Plant Physiol. Biochem.** **47**(8), pp 663-670.
- 368) Sylvester, B. and Makepeace R. J. (1984) "A code for stages of development in oilseed rape (*Brassica napus* L.)" **Asp. App. Bio.** (6), pp 398-419.
- 369) Takahashi E., Ma J. F., Miyake Y. (1990) "The possibility of silicon as an essential element for higher plants." **Comments on J. Agric. Food Chem.** **2**, pp 99–102.
- 370) Tamai K. and Ma J. F. (2003) "Characterization of silicon uptake by rice roots" **New Phytol.** **158**, pp 431–436.
- 371) Tayyab M., Islam W., and Zhang H. (2018) "Promising role of silicon to enhance drought resistance in wheat" **Commun Soil Sci Plant Anal.** **49**(22), pp 2932-2941.
- 372) Terzi R. and Kadioglu A. (2006) "Drought stress tolerance and antioxidant enzyme system in *Ctenanthe setosa*" **Acta Biol Crac Ser Bot.** **48**, pp 89-96.
- 373) Tohidi-Moghadam H. R., Shirini-Rad A. H., Nour-Mohammadi G., Habibi D. and Mashhadi-Akbar-Boojar M. (2009) "Effect of super absorbent application on antioxidant enzyme activities in canola (*Brassica napus* L.) cultivars under water stress conditions" **Am J Agric Biol Sci.** **4**, pp 215–223.
- 374) Tohidi-Moghaddam H. R., Zahedi H. and Ghooshchi F. (2011) "Oil quality of canola cultivars in response to water stress and super absorbent polymer application" **Pesqui Agropecu Trop.** **41** (4), pp 579-586.
- 375) Torabi F., Majd A., Enteshari S. (2015) "The effect of silicon on alleviation of salt stress in borage (*Borago officinalis* L.)" **Soil Sci. Plant Nutr.** **61**, pp 788–798.
- 376) Tripathi D.K., Singh S., Singh V.P., Prasad S.M., Dubey N.K. and Chauhan D.K. (2017) "Silicon nanoparticles more effectively alleviated UV-B stress than silicon in wheat (*Triticum aestivum*) seedlings" **Plant Physiol. Biochem.** **110**, pp 70-81.
- 377) Turinek M, Bavec M, Repič M, Turinek M, Krajnc A U, Möllers C, Tres A. and Bavec F. (2016) "Effects of intensive and alternative production systems on the technological and quality parameters of rapeseed seed (*Brassica napus* L. 'Siska')" **J. Sci. Food Agric.** **97**(8), pp 2647-2656.
- 378) Turner N. C., Wright G. C. and Siddique K. H. M. (2001) "Adaptation of grain legumes (pulses) to water-limited environments." **Adv. Agron.** **71**, pp 193–231.
- 379) Ozgen U., Mavi O., Terzi Z., Yildirim A., Coskun M., Houghton P. J. (2006) "Antioxidant properties of some medicinal Lamiaceae (Labiatae) species" **Pharm. Biol.** **44**, pp 107– 112.

- 380) Ullah F., Bano A., Nosheen A. (2012) "Effects of plant growth regulators on growth and oil quality of canola (*Brassica napus* L.) under drought stress" **Pak J Bot.** **44**, pp 1873-1880.
- 381) Varga L., Ložek O., Ducsay L., Kováčik P., Lošák T., Hlušek J. E. (2014) "Effect of topdressing with nitrogen and boron on the yield and quality of rapeseed" **Acta Univ. Agric. et Silv.** **58**, pp 391–398.
- 382) Verbruggen N. and Hermans C. (2008) "Proline accumulation in plants: A review" **Amino Acids**, **35**(4), pp 753-759.
- 383) Vinocur B. and Altman A. (2005) "Recent advances in engineering plant tolerance to abiotic stress: achievements and limitations" **Curr. Opin. Biotechnol.** **16**(2), pp 123-132.
- 384) Vinya R. et al. (2013) "Xylem cavitation vulnerability influences tree species' habitat preferences in miombo woodlands" **Oecologia**. **173**, pp 711–720.
- 385) Wang W. B., Kim Y. H., Lee H. S., Kim K. Y., Deng X. P. (2009) "Analysis of antioxidant enzyme activity during germination of alfalfa under salt and drought stresses" **Plant Physiol. Biochem.** **47**, pp 570–577.
- 386) Wahid R., Ward A. J., Møller H. B., Søgaard K. and Eriksen J. (2015) "Biogas potential from forbs and grass-clover mixture with the application of near infrared spectroscopy" **Bioresour. Technol.** **198**, pp 124–132.
- 387) Walton G., Mendham N., Robertson M. and Potter T. (1999) "Canola, Phenology, Physiology and Agronomy" **Proceedings of the 10th international Rapeseed Congress, Canberra, Australia.**
- 388) Website Addresses, [www.canola-council.org](http://www.canola-council.org) and [www.fao.org](http://www.fao.org)
- 389) Weiss E. A. (1983) "Oilseed crops. (Longman: London). Oil seed crops. Longman" London.
- 390) Wenda-Piesik A., Hoppe S. (2018) "Evaluation of hybrid and population cultivars on standard and high-input technology in winter oilseed rape" **Acta Agric. Scand. Sect. B Soil Plant Sci.** **68**, pp 678–689.
- 391) White B., Tubana B.S., Babu T., Mascagni H., Agostinho F., Datnoff L.E., Harrison S. (2017) "Effect of silicate slag application on wheat grown under two nitrogen rates" **Plants**. **6**(4), pp 47.
- 392) Wright P. R., Morgan J. M., Jessop R. S., and Gass A. (1995) "Comparative adaptation of canola (*Brassica napus*) and Indian mustard (*B. juncea*) to soil water deficits: yield and yield components" **Field Crops Res.** **42**, pp 1-13.
- 393) Wright P. R., Morgan J. M. and Jessop R. S. (1996) "Comparative adaptation of canola (*Brassica napus*) and Indian mustard (*B. juncea*) to soil water deficits: Plant water relations and growth" **Field Crops Res.** **49** (1), pp 51-64.

- 394) Wu F.Z., Bao W.K. and Li F.L. (2008) “Effects of drought stress and N supply on the growth, biomass partitioning and water use efficiency of *Sophora davidii* seedlings” **Environ. Exp. Bot.** **63**, pp 248–255.
- 395) Wu H., Wu X., Li Z., Duan L. and Zhang M. (2012) “Physiological evaluation of drought stress tolerance and recovery in cauliflower (*Brassica oleracea* L.) seedlings treated with methyl jasmonate and coronatine” **Plant Growth Regul.** **31**, pp 113–123.
- 396) Xu L., Islam F., Ali B., Pei Z., Li J., Ghani M. A. et al. (2017) “Silicon and water-deficit stress differentially modulate physiology and ultrastructure in wheat (*Triticum aestivum* L.)” **Biotech.** **7**, pp 273.
- 397) Xu C., McDowell N. G., Sevanto S. and Fisher R. A. (2013) “Our limited ability to predict vegetation dynamics under water stress” **New Phytol.** **200**, pp 298–300.
- 398) Xu W., Cui K., Xu A., Nie L., Huang J. and Peng Sh. (2015) “Drought stress condition increases root to shoot ratio via alteration” **Acta Physiol Plant.** **37**, pp 9.
- 399) Xue G., Lynne McIntyre C., Glassop D. and Shorter R. (2008) “Use of expression analysis to dissect alterations in carbohydrate metabolism in wheat leaves during drought stress” **Plant Mol Biol.** **67**, pp 197–214.
- 400) Yancey P. H. (1994) “Compatible and counteracting solutes” **Cellular and Molecular P.** pp 81–109.
- 401) Yang J.C., Zhang J.H., Wang Z.Q., and Liu L. (2003) “Postanthesis water deficits enhance grain filling in two-line hybrid rice” **Crop Science.** **43**, pp 2099–2108.
- 402) Yarnia M., Arabifard N., Koei F. K., Zandi Z. (2011) “Evaluation of drought tolerance indices among some winter rapeseed cultivars” **Afr. J. Biotechnol.** **10**, pp 10914–10922.
- 403) Yin L., Wang S., Li J., Tanaka K., Oka M. (2013) “Application of silicon improves salt tolerance through ameliorating osmotic and ionic stresses in the seedling of *Sorghum bicolor*” **Acta Physiol. Plant.** **35**, pp 3099–3107.
- 404) You J. and Chan Z. (2015) “ROS regulation during abiotic stress responses in crop plants” **Front. Plant Sci.** **6**, pp 1–15.
- 405) Yu S.M., Lo S. F., Ho T. H. D. (2015) “Source–sink communication: Regulated by hormone, nutrient, and stress cross-signaling” **Trends Plant Sci.** **20**, pp 844–857.
- 406) Yuncai H. and Schmidhalter U. (2005) “Drought and salinity: A comparison of the effects of drought and salinity” **J. Plant Nutr. Soil Sci.** **168**, pp 541–549.
- 407) Zahedi H., Moghdam H. R. T. (2011) “Effect of drought stress on antioxidant enzymes activities with zeolite and selenium application in canola cultivars” **Res Crops.** **12**, pp 388–392.

- 408) Zahoor R., Dong H., Abid M., Zhao W., Wang Y. and Zhou Zh. (2017) "Potassium fertilizer improves drought stress alleviation potential in cotton by enhancing photosynthesis and carbohydrate metabolism" **Environ. Exp. Bot.** **137**, pp 73-83.
- 409) Zain N. A. M., Ismail M. R., Mahmood M., Puteh A., Ibrahim M.H. (2014) "Alleviation of water stress effects on MR220 rice by application of periodical water stress and potassium fertilization. **Molecules**" **19**, pp1795–1819.
- 410) Zandalinas S. I., Mittler R., Balfagón D., Arbona V., Gómez-Cadenas A. (2018) "Plant adaptations to the combination of drought and high temperatures" **Physiol. Plant.** **162**, pp 2–12.
- 411) Zanetti L. V., Milanez C. R. D., Gama V. N., Aguilar M. A. G., Souza C. A. S., Campostrini E. et al. (2016) "Leaf application of silicon in young cacao plants subjected to water deficit" **Pesqui. Agropecu. Bras.** **51**, pp 215–223.
- 412) Zarei G., Shamsi H., Dehghani S.M. (2010) "The effect of drought stress on yield, yield components and seed oil content of three autumnal rapeseed cultivars (*Brassica napus* L.)" **Res. J. Agric.** **6**, pp 29-37.
- 413) Zayed B. A., Salem A. K. M., and Sharkawy H. M. (2011) "Effect of different micronutrient treatments on rice (*Oriza sativa* L.) growth and yield under saline soil conditions" **World J. Agric. Sci.** **7**, pp 179-184.
- 414) Zhang G., Tanakamaru K., Abe J., Morita S. (2006) "Influence of water logging on some anti-oxidative enzymatic activities of two barley genotypes differing in anoxia tolerance" **Acta Physiol. Plant.** **29**, pp 171-176.
- 415) Zhang H., Schonhof I., Krumbein A., Gutezeit B., Li L., Stutzel H., and Schreiner M. (2008) "Water supply and growing season influence glucosinolate concentration and composition in turnip root (*Brassica rapa* ssp. *rapifera* L.)" **J. Soil Sci. Plant Nutr.** **171**, pp 255–265.
- 416) Zhou L., Wang H., Chen X., Li Y., Hussain N., Cui L., Wu D. and Jiang L. (2016) "Identification of candidate genes involved in fatty acids degradation at the late maturity stage in *Brassica napus* based on transcriptomic analysis" *Plant Growth Regul.* **83**, pp 385-396.
- 417) Zhu Z., Wei G., Li J., Qian Q., Yu J. (2004) "Silicon alleviates salt stress and increases antioxidant enzymes activity in leaves of salt-stressed cucumber (*Cucumis sativus* L.)" **Plant Sci.** **167**, pp 527-533.
- 418) Zúkalová H., Vašák J. (2002) "The role and effects of glucosinolates of *Brassica* species" A review. **Plant Soil Environ.** **48**, pp 175–180.

# Abstract

Drought stress is one of the most important environmental factors restricting crop growth and development. The use of nutrients such as potassium silicate to produce grain yield and to reduce the side effects of drought stress on canola can play a role in increasing production and quality. In order to study the effects of terminal drought stress and foliar application of potassium silicate on yield and canola spring genotypes components, a factorial split-plot test was conducted in Karaj-Iran in a randomized complete block configuration with three replications for two years of cultivation (2016-2018). The irrigation was 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 comprised of 0 and 4 g liter<sup>-1</sup> 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 of this study showed that the studied traits were affected by applied treatments, so that the highest grain yield (5620 kg/ha), oil yield (2601 kg/ha), oleic acid (68.16%), linoleic acid (18.68%) was obtained in full irrigation conditions with foliar application in OG×AL genotype. RGS×SLM genotype was also the best genotype under stress conditions with foliar application of potassium silicate. End-of-season drought stress increased stomatal resistance, leaf proline, leaf soluble carbohydrate, canopy temperature, grain glucosinolate and decreased total chlorophyll content, relative leaf water content, catalase enzymes, superoxide dismutase and peroxidase. Finally, our study showed the beneficial effects of Potassium Silicate in improving the drought tolerance of canola plants, especially at the end of the season. This can provide a basis for attempting new strategies to reduce the damage from drought and create a functional link between the role of silicon, physiological response and tolerance to drought stress in canola plants. OG×AL genotype is recommended under normal irrigation conditions and Potassium silicate foliar application. RGS×SLM and DALGAN genotypes are recommended under late-season drought stress conditions (With holding irrigation from silique formation) and potassium silicate foliar application.

**Keywords:** Drought stress, Enzyme, Fatty acid, Potassium silicate, Rapeseed.



Shahrood University of Technology

Faculty of Agricultural Engineering

Ph.D. Thesis in

# **Evaluation of ecophysiological response of canola spring genotypes to foliar application of potassium silicate under terminal drought stress conditions**

By: Mojdeh Sadat Khayat Moghadam

Supervisor:

Dr. Ahmad Gholami

Prof. Dr. Amir Hosein Shirani Rad

Advisor:

Dr. Mahdi Baradaran Firooz Abadi

Dr. Hamid Abbas Dokht

Jan 2021