

اثر تنش خشکی و کاربرد ژئولیت بر برخی خصوصیات فیزیولوژیکی، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و عملکرد کمی و کیفی ژنوتیپ‌های کلزا (*Brassica napus* L.)

امید لطفی فر^{۱*}، لیلا متقی^۲، امیرحسین شیرانی‌راد^۳، سمانه متقی^۱

^۱گروه علوم کشاورزی، دانشگاه پیام‌نور، تهران، ایران.

^۲پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

^۳موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

تاریخ دریافت: ۹۵/۱۲/۸ تاریخ پذیرش: ۹۶/۳/۱۳

چکیده

به‌منظور بررسی تأثیر کاربرد ژئولیت بر برخی خصوصیات فیزیولوژیکی، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و عملکرد دانه و روغن گیاه کلزا در شرایط تنش خشکی آزمایشی به‌صورت فاکتوریل-اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار در مزرعه تحقیقات موسسه اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج اجرا شد. تنش خشکی در سه سطح (آبیاری پس از ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد تخلیه رطوبتی به‌ترتیب به عنوان عدم تنش، تنش متوسط و تنش شدید) و کاربرد ژئولیت در دو سطح (صفر و ۱۰ تن در هکتار ژئولیت) به صورت فاکتوریل در کرت‌های اصلی و ژنوتیپ‌های کلزا (لاین KR4 و Eldo و ارقام GKH305 و Anatol) در کرت‌های فرعی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که تنش خشکی، در تمامی سطوح ژئولیت و ژنوتیپ‌های کلزا، سبب کاهش آب نسبی برگ و افزایش درجه‌حرارت سایه‌انداز و مقاومت روزنه‌ای، همچنین میزان قندهای محلول و پرولین و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کاتالاز و پراکسیداز و میزان مالون دی‌آلدئید در برگ‌های جوان بالای بوته گردید. دو تنش متوسط و شدید خشکی سبب کاهش عملکرد دانه روغن شد. با افزایش شدت تنش کارایی ژئولیت در کاهش اثرات منفی تنش افزایش یافت و استفاده از آن در شرایط اعمال تنش متوسط و شدید باعث کاهش معنی‌دار در فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کاتالاز و پراکسیداز، همچنین کاهش میزان قندهای محلول و غلظت پرولین شد. کاربرد ژئولیت موجب افزایش معنی‌دار عملکرد دانه در تیمار عدم تنش، تنش متوسط و شدید و افزایش عملکرد. در بین ژنوتیپ‌ها لاین KR4 و رقم GKH305 به‌ترتیب در صورت استفاده و عدم استفاده از ژئولیت بالاترین عملکرد دانه را داشتند ولی با اعمال تنش متوسط و شدید رقم Anatol کم‌ترین میزان خسارت و بالاترین عملکرد را در بین ژنوتیپ‌های مورد بررسی به خود اختصاص داد. براساس نتایج به‌دست آمده، استفاده از ژئولیت در تمامی سطوح تنش سبب افزایش معنی‌دار عملکرد کلزا شد که با افزایش محدودیت آبی، کارایی آن بالاتر رفت.

واژه‌های کلیدی: تنش خشکی، پراکسیداز، پرولین، کاتالاز و مالون‌دی‌آلدئید.

کننده الکترون به آب احیا می‌کنند (Shen et al., 2010).

در دوره تنش، گیاه به منظور گریز از پلاسمولیز و ادامه تورژسانس در سلول‌های خود، مولکول‌های درشت نظیر نشاسته را به ساکارز و سپس مولکول‌های کوچکتری مانند گلوکز و فروکتوز تبدیل می‌کند که این موضوع موجب منفی‌تر شدن پتانسیل آب در سلول‌ها و تنظیم اسمزی می‌شود (Shubhra et al., 2004). پژوهشگران با تحقیق بر روی اثر تنش شدید خشکی بر گیاه کلزا دریافتند که در شرایط تنش، ارقام حساس، به دلیل کاهش آب خارج سلولی، میزان قند محلول بالاتری دارند (Hatamvand et al., 2014). میزان نسبی آب برگ از جمله پارامترهایی است که اغلب برای ارزیابی وضعیت آبی گیاه استفاده می‌شود و یکی از ویژگی‌های مهم در شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به تنش خشکی محسوب می‌گردد به طوری که ارقام متحمل‌تر در شرایط تنش خشکی، به ویژه تنش اعمال شده در مرحله رشد زایشی، رطوبت نسبی بالاتری دارند (Ghaffari et al., 2011).

اضافه کردن مواد اصلاحی مانند ژئولیت‌ها به خاک برای افزایش کارایی مصرف آب و بهبود خواص فیزیکی خاک یکی از مهمترین راه‌های مقابله با کاهش عوارض کمبود آب به شمار می‌رود (Polat et al., 2004). ژئولیت‌ها گروهی از آلومینوسیلیکات‌های دارای ساختمان بلوری ویژه با قابلیت بالای جذب و ذخیره‌سازی آب هستند. همچنین به دلیل ظرفیت تبادل کاتیونی بالا و قرار گرفتن بعضی کاتیون‌ها مانند آمونیوم در شبکه خود، علاوه بر این که در خاک نقش اصلاح کنندگی دارند، نقش تغذیه‌ای داشته و منجر به بهبود رشد گیاه بخصوص در اراضی با قابلیت تبادل کاتیونی پایین می‌شوند (Zahedi et al., 2009). پیش از این تاثیر مثبت کاربرد ژئولیت در بهبود رشد و افزایش عملکرد

کلزا از نظر تولید روغن خوراکی در جهان پس از سویا در رتبه دوم قرار دارد (FAO, 2015). در ایران نیز با توجه به اهمیت بالای روغن‌های خوراکی و کیفیت بالای کنجاله کلزا برای خوراک دام، کشت این گیاه در چند سال اخیر توسعه چشمگیری یافته است (Moghaddam and Pourdad, 2011). امروزه بیش از یک سوم اراضی دنیا در مناطق خشک و نیمه خشک قرار گرفته است که دچار محدودیت آب هستند (Tunturk and Ciftci, 2007). کلزا نیز از جمله گیاهان زراعی است که به شدت تحت تاثیر تنش خشکی قرار می‌گیرد (Jabbari et al., 2015; Shiahbidi et al., 2014). تنش خشکی سبب تغییرات متفاوت فیزیولوژیکی در گیاه می‌گردد که از آن جمله می‌توان به افزایش دمای سایه انداز گیاهی گیاه (Pasban Eslam., 2014)، غلظت اسید آمینه پرولین (Hatamvand et al., 2014)، کاهش آب نسبی برگ (Hamed et al., 2014)، افزایش غلظت قندهای محلول (Ma et al., 2006)، افزایش مقاومت روزنه‌ای (Kusvuran, 2011) و افزایش غلظت ترکیبات آنتی‌اکسیدانی (Shen et al., 2010) اشاره کرد.

در شرایط تنش خشکی، به دلیل افزایش فعالیت رادیکال آزاد اکسیژن، پراکسید هیدروژن به عنوان یک ماده اکسید کننده در کلزا تولید می‌شود و خسارت شدیدی به غشاهای سلولی وارد می‌کند (Vaziri and Naderi, 2014). بررسی تنش خشکی در گیاه سویا نیز نشان داد که گونه‌های فعال اکسیژن مهم‌ترین عوامل آسیب‌رسان به سیستم فتوسنتزی نیز می‌باشد و گیاه برای کاهش دادن اثر مخرب آن، سازوکارهای متفاوتی دارند که از جمله می‌توان به سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی اشاره کرد که در آن آنزیم‌های زداینده پراکسید هیدروژن از جمله کاتالاز و پراکسیداز، هیدروژن را با استفاده از سوبستراهای مختلف اهداء

پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در چهار تکرار انجام گرفت. مزرعه محل انجام آزمایش با متوسط بارندگی سالانه بلندمدت ۲۵۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۱۵/۰ درجه سانتی‌گراد در اقلیمی نیمه خشک واقع شده است.

نوع طرح و تیمارهای آزمایشی: تیمارهای مورد آزمون عبارت بودند از تنش خشکی در سه سطح عدم تنش (آبیاری پس از ۴۰ درصد تخلیه رطوبتی)، تنش متوسط (آبیاری پس از ۶۰ درصد تخلیه رطوبتی) و تنش شدید (آبیاری پس از ۸۰ درصد تخلیه رطوبتی)، میزان ژئولیت در دو سطح عدم کاربرد ژئولیت و کاربرد ۱۰ تن ژئولیت طبیعی در هکتار (تهیه شده از معادن استان سمنان) و ژنوتیپ‌های کلزا شامل دو رقم Anatol و Gkh305 و دو لاین امید بخش Kr4 و Eldo. در این آزمایش دو تیمار تنش خشکی و ژئولیت به صورت فاکتوریل در کرت‌های اصلی و ارقام کلزا در کرت‌های فرعی جای گرفتند. مشخصات ژنوتیپ‌های مورد استفاده در جدول (۱) ارائه گردیده است.

گلرنگ (Mirzakhani, 2013)، شلغم روغنی (Ahmadi-Azar et al., 2012)، پنیوک (Shojaee et al., 2015)، آفتابگردان (Gholam Hoseini et al., 2015)، و کدو پوست کاغذی (Naeemi et al., 2012) به‌ویژه در شرایط تنش خشکی گزارش شده است. هدف از این تحقیق بررسی اثرات متقابل تنش خشکی و استفاده از ماده معدنی ژئولیت بر میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و برخی خصوصیات فیزیولوژیک و عملکرد دانه و روغن ژنوتیپ‌های مختلف گیاه کلزا و تعیین میزان کارایی ژئولیت در کاهش اثرات تنش خشکی بود.

مواد و روش‌ها

زمان و مکان انجام آزمایش: این آزمایش در سال زراعی ۹۲-۱۳۹۱ در مزرعه تحقیقاتی موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج واقع در عرض جغرافیایی ۳۵/۵۹ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۵۰/۷۵ درجه شرقی و ارتفاع ۱۳۱۳ متر از سطح دریا به صورت آزمایش فاکتوریل- اسپلیت

جدول ۱: اسامی و مبدأ ژنوتیپ‌های مورد بررسی در آزمایش.

مبدأ	ژنوتیپ	نوع رقم
آلمان	Anatol	ارقام
مجارستان	Gkh	
ایران	KR4	لاین امید بخش
ایران	Eldo	

فیزیکی و شیمیایی به آزمایشگاه منتقل شدند. مشخصات خاک محل آزمایش در جدول (۲) آمده است.

مشخصات خاک محل آزمایش: جهت اجرای آزمایش، از نقاط مختلف خاک مزرعه در دو عمق ۳۰-۶۰ و ۳۰-۰ سانتی‌متری نمونه‌برداری به‌صورت مرکب صورت گرفت و نمونه‌ها جهت تعیین خواص

جدول ۲: مشخصات خاک مزرعه آزمایشی

عمق نمونه‌گیری		خصوصیات خاک
۳۰-۶۰ سانتی‌متر	۰-۳۰ سانتی‌متر	
۱/۲۲	۱/۴۶	شوری ($dS.m^{-1}$)
۷/۴	۷/۷	pH
۰/۹۹	۰/۸۹	کربن آلی (%)
۰/۰۷	۰/۰۹	نیتروژن کل (%)
۱۵/۶	۱۴/۹	فسفات قابل جذب ($mg.kg^{-1}$)
۱۵۱	۱۹۶	فسفات قابل جذب ($mg.kg^{-1}$)
۳۱	۲۹	رس (%)
۴۸	۴۷	سیلت (%)
۲۱	۲۴	شن (%)
لومی	رسی-لومی	بافت خاک

جدول ۳: میزان بارندگی ماهیانه (میلی‌متر) طی فصل رشد کلزا در منطقه آزمایش (کرج)

مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	مجموع
۱/۲	۱۰/۶	۲۶/۴	۳۳/۵	۳۰/۲	۵۵/۳	۲۹/۱	۱۰/۷	۵/۰	۱۹۴/۵

در عمق ۳ سانتی‌متری کشت گردید. فاصله بوته‌ها روی خطوط کاشت ۴ سانتی‌متر بود که بر این اساس تراکم بوته‌ها ۸۳ بوته در مترمربع در نظر گرفته شد. تاریخ اولین آبیاری که به‌عنوان تاریخ کاشت در نظر گرفته شد ۲۱ مهر بود.

تنش خشکی بر اساس درصد تخلیه رطوبتی خاک اعمال گردید. تنش خشکی از مرحله سبز شدن و استقرار بوته‌ها تا زمان برداشت انجام گردید. تیمار تنش خشکی شامل ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد تخلیه رطوبتی از رطوبت قابل دسترس در محدوده ریشه گیاه بود. اندازه‌گیری میزان رطوبت با استفاده از دستگاه رطوبت سنج خاک TRIM-TDR صورت گرفت. میزان رطوبت خاک هر سه روز یکبار اندازه‌گیری و با توجه به تیمار تنش خشکی هر کرت و نمودار تخلیه رطوبتی (شکل ۱)، زمان آبیاری تعیین شد. میزان آب ورودی به هر کرت نیز با استفاده از کنتور محاسبه گردید و عمق آب استفاده شده در هر تیمار رطوبتی با استفاده

مراحل آماده‌سازی زمین، کشت و اعمال تیمارها:

به‌منظور تأمین رطوبت برای جوانه‌زنی بذر، زمین قبل از کاشت آبیاری شد. براساس آزمون خاک، کود اوره به میزان ۳۵۰ کیلوگرم در هکتار (در سه نوبت شامل ۱۰۰ کیلوگرم در مرحله ۲ تا ۴ برگ، ۱۵۰ کیلوگرم در مرحله ساقه‌دهی و ۱۰۰ کیلوگرم در مرحله غنچه‌دهی) و کودهای سولفات پتاسیم و سوپرفسفات تریپل هر کدام به میزان ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار در مرحله آماده‌سازی زمین به همراه ۲/۵ لیتر در هکتار علف‌کش ترفلان به سطح خاک اضافه و با استفاده از دیسک سطحی با خاک مخلوط گردیدند.

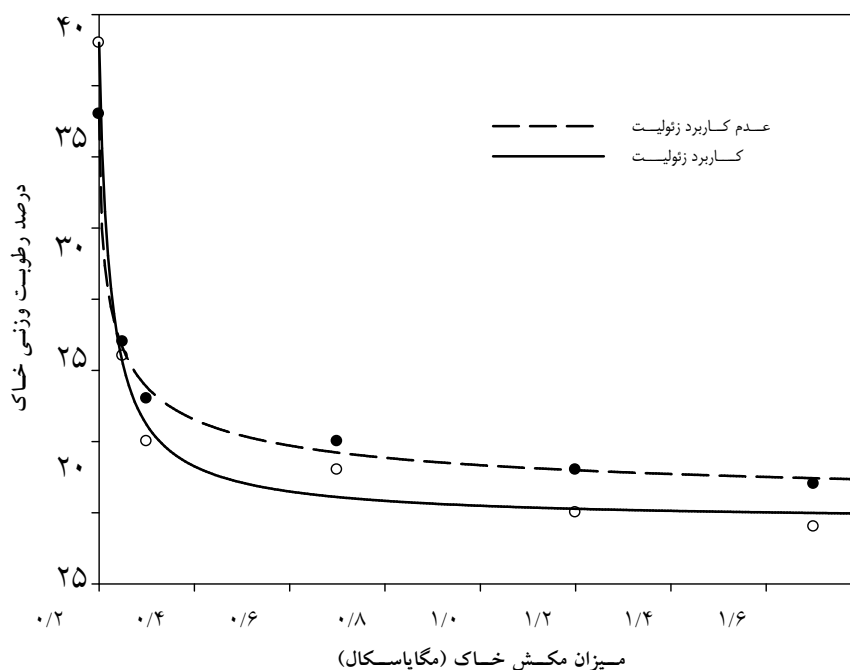
زئولیت در کرت‌های مورد نظر قبل از مرحله دیسک در سطح خاک پاشیده و تا عمق ۲۰ سانتی‌متری با خاک مخلوط گردید. در نهایت هر واحد آزمایشی شامل چهار پشته عریض با طول ۶ متر شامل ۸ خط کشت با فاصله ۳۰ سانتی‌متر بود. کاشت به صورت دستی انجام گرفت و به‌منظور اطمینان از سبز شدن حداقل یک بذر در هر نقطه کشت، ۵ بذر

درصد رطوبت وزنی در مرحله ظرفیت مزرعه، θ :
متوسط وزنی رطوبت وزنی خاک در عمق ریشه بر
حسب درصد، BD: وزن مخصوص ظاهری خاک
(g/m^3): D: عمق موثر ریشه.

از رابطه ۱ محاسبه گردید (Parvizi and Nabati, 2004):

$$V_m = [D \times (Fc - \theta) \times Db] \times 100 \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن V_m : میزان آب با واحد مترمکعب، F_c :



شکل ۱: منحنی رطوبتی خاک مزرعه در دو تیمار مصرف و عدم مصرف زئولیت

بدین منظور در ساعت هفت صبح سه برگ جوان و توسعه یافته از یک سوم بالای پوشش گیاهی از سه ردیف میانی هر کرت برداشت و در کیسه‌های پلاستیکی در ظرف محتوی یخ قرار داده شدند. سپس درصد محتوای نسبی آب برگ با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید (Omae et al., 2007):

$$RWC (\%) = (FW - DW) / (TW - DW) \times 100 \quad \text{رابطه ۱}$$

که RWC: محتوای نسبی آب برگ، FW: وزن تر برگ، TW: وزن برگ در حالت اشباع و DW: وزن خشک برگ است.

دمای سایه‌انداز: جهت محاسبه دمای سایه‌انداز گیاهی در مرحله شروع پر شدن دانه و در ساعت بین ۱۱ تا ۱۳ ظهر، در سه نقطه کف زمین واقع در

نحوه برداشت و اندازه‌گیری صفات

عملکرد دانه و روغن: جهت ارزیابی عملکرد دانه در هر کرت، پس از حذف نیم متر از ابتدا و انتهای خطوط کشت به‌عنوان حاشیه و از چهار خط میانی، برداشت انجام گردید. غلاف‌ها به صورت دستی از خورجین جدا شدند و عملکرد دانه بر حسب کیلوگرم در هکتار محاسبه شد. درصد روغن دانه با استفاده از دستگاه NMR مدل H20-18-25A ساخت کارخانه Broker کانادا در بخش تحقیقاتی دانه‌های روغنی موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج اندازه‌گیری شد.

محتوای نسبی آب برگ: محتوای نسبی آب برگ در فواصل مشخص (هر هشت روز) اندازه‌گیری شد.

به منظور ارزیابی میزان پراکسیداسیون لیپیدهای غشای سلولی به وسیله تست تیوباربیتوریک اسید و جهت سنجش میزان مالون دی آلدئید با استفاده از روش هیث و پاکر (Heath and Pacher, 1968) استفاده شد. همچنین اندازه‌گیری کل قندهای محلول به روش فنل - اسیدسولفوریک (بر اساس روش AOAC, 1995) محاسبات آماری با استفاده از نرم‌افزار MSTATC و مقایسه میانگین‌ها به روش دانکن در سطح ۵ درصد انجام شد.

نتایج

اثر ژئولیت بر صفات میزان قندهای محلول، پرولین، مالون‌دی‌آلدئید، مقاومت روزنه‌ای، محتوای نسبی آب برگ، درجه حرارت سایه‌انداز گیاهی، درصد روغن و عملکرد دانه و روغن در سطح یک درصد و بر فعالیت پراکسیداز و کاتالاز در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود (جدول‌های ۴ و ۵). اثر تنش خشکی و اثر متقابل ژئولیت و تنش خشکی بر کلیه صفات در سطح یک درصد معنی‌دار و اثر ژئوتیپ نیز بر کلیه صفات به جز غلظت قندهای محلول، میزان پرولین و مالون‌دی‌آلدئید معنی‌دار بود. همچنین اثر متقابل تنش خشکی و ژئوتیپ، اثر متقابل ژئولیت و ژئوتیپ و اثر متقابل تنش خشکی، ژئولیت و ژئوتیپ بر صفات مقاومت روزنه‌ای، درجه حرارت سایه‌انداز گیاهی، درصد روغن و عملکرد دانه و روغن در سطح یک درصد معنی‌دار، ولی بر سایر صفات اثر معنی‌داری نداشتند (جدول‌های ۴ و ۵).

حدواسط دو ردیف میانی دما اندازه‌گیری و میانگین آن به عنوان دمای سایه‌انداز گیاهی هر کرت درج گردید.

میزان مقاومت روزنه‌ای: میزان مقاومت روزنه‌ای در فواصل نمونه‌برداری (هر هشت روز)، توسط دستگاه پرومتر (مدل Delta-T AP4, Delta-T Devices, Cambridge, UK) بین ساعت ۶ تا ۸ صبح اندازه‌گیری شد. بدین منظور قسمت میانی چند برگ جوان از بخش یک سوم بالایی گیاه که به طور کامل توسعه یافته‌اند از هر کرت آزمایشی انتخاب و در محفظه دستگاه قرار گرفته شد و عدد روی دستگاه ثبت شد.

صفات بیوشیمیایی: جهت اندازه‌گیری ویژگی‌های بیوشیمیایی بین ساعت ۱۱-۱۳ ظهر در سه مرحله رشدی شامل مرحله رویشی (مشخصه رشدی مثلاً چند برگی یا تاریخ دقیقاً ذکر شود)، همزمان با ۵۰ درصد گل‌دهی و همزمان با خورجین‌دهی کامل قبل از اعمال آبیاری نمونه برگ تهیه شد. به این ترتیب که پنج برگ از ساقه جدا شد و درون پاکت‌های آلومینیومی در کلمن حاوی ازت مایع جهت انجماد فوری قرار داده شدند و بلافاصله به آزمایشگاه پژوهشکده بیوتکنولوژی کشاورزی منتقل گردیدند و سپس در فریزر در دمای ۴۰- درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند.

اندازه‌گیری میزان پرولین بر اساس روش بیتس (Bates et al., 1973)، فعالیت آنزیم پراکسیداز (EC 1,11,1,7 (POX، به روش چانس و مهلی (Chance and Maehly, 1955) و فعالیت آنزیم کاتالاز (EC 1,11,1,6 (TCA به روش ابی (Aebi, 1984) انجام شد.

جدول ۴: تجزیه واریانس صفات فیزیولوژیکی ژنوتیپ‌های مختلف کلزا تحت تاثیر تنش خشکی و ژنولیت

تیمار	درجه آزادی	میانگین مربعات			
		غلظت کل قندهای محلول	میزان پرولین	فعالیت پراکسیداز	فعالیت کاتالاز
تکرار	۳	۰/۳**	۱/۵۲۹ ^{n.s}	۱۷/۲۱*	۴۴/۲۹ ^{n.s}
ژنولیت (A)	۱	۶۵۲۳۱/۲**	۲۱۲/۶۶۲**	۱۹/۵۴*	۱۰۲/۲۶*
تنش خشکی (B)	۲	۷۵۴۱۱/۸**	۸۴/۵۲۱**	۱۳۱/۸۷**	۲۹۷/۲۱**
A×B	۲	۱۶۵۲۱/۵**	۳/۱۲۱*	۵۹/۶۵**	۲۱۵/۲۳**
خطای اصلی	۱۵	۹۵۶/۲	۰/۶۲۳	۳/۳۵	۱۴/۶۶
ژنوتیپ (C)	۳	۹۸۵/۹ ^{n.s}	۰/۲۸۷ ^{n.s}	۱۵/۲۹**	۵۵/۹۳**
A×C	۳	۱۱۱۲/۰ ^{n.s}	۰/۲۴۵ ^{n.s}	۲/۷۹ ^{n.s}	۱۹/۴۸ ^{n.s}
B×C	۶	۸۹۷/۵ ^{n.s}	۰/۲۱۹ ^{n.s}	۲/۹۵ ^{n.s}	۱۴/۱۴ ^{n.s}
A×B×C	۶	۶۵۱/۳ ^{n.s}	۰/۱۹۵ ^{n.s}	۳/۲۱ ^{n.s}	۱۲/۹۱ ^{n.s}
خطای فرعی	۵۴	۴۰۵/۳	۰/۱۱۴ ^{n.s}	۱/۸۳	۸/۱۲
C.V		۱۱/۷۶	۱۰/۴	۹/۳	۵/۵

** و * به ترتیب معنی دار در سطح ۱ و ۵ درصد و ^{n.s} عدم معنی داری.

جدول ۵: تجزیه واریانس برخی صفات ژنوتیپ‌های مختلف کلزا تحت تاثیر تنش خشکی و ژنولیت.

تیمار	d.f	میانگین مربعات			
		مقاومت روزنه‌ای	محتوای نسبی آب برگ	دمای سایه‌انداز گیاهی	درصد روغن
تکرار	۳	۰/۳۸۶**	۶/۸۱۶**	۵۶/۶۲**	۰/۳۶۱۷**
ژنولیت (A)	۱	۱۲۸/۶۸۶**	۴۲۴۰/۶۰**	۱۳۷۰/۱۴**	۱۶۳۸۹۷۳۲**
تنش خشکی (B)	۲	۴۰۶۴/۲۱۳**	۸۴۴۴۸/۵۵**	۸۱۲۱/۶۲**	۱۵۵۲۸۰۹۱۶**
A×B	۲	۲۳/۵۷۶**	۶۶/۸۶**	۳۱/۵۲**	۱۱۷۷۷۶۰**
خطای اصلی	۱۵	۰/۰۳۸	۰/۸۳۲	۰/۱۴	۰/۰۰۹۹
ژنوتیپ (C)	۳	۰/۷۳۶**	۰/۲۷۲ ^{n.s}	۱۳/۰۹**	۰/۵۰۱۷**
A×C	۳	۰/۵۰۹**	۰/۲۶۴ ^{n.s}	۷/۰۱**	۰/۷۸۸۴**
B×C	۶	۰/۳۱۸**	۰/۳۹۶ ^{n.s}	۱۰/۳۲**	۰/۸۲۳۹**
A×B×C	۶	۰/۷۱۷**	۰/۳۴۴ ^{n.s}	۱۰۵۹۲/۲۱**	۰/۵۸۴۵**
خطای فرعی	۵۴	۰/۰۱۳	۰/۲۲۴	۰/۱۱	۰/۰۰۷۶
C.V		۲/۵	۰/۶	۱/۶	۰/۲۱

** و * به ترتیب معنی دار در سطح ۱ و ۵ درصد و ^{n.s} عدم معنی داری.

شدید غلظت قندهای محلول را به ترتیب ۵۳ و ۱۰۳ درصد و در شرایط استفاده از ژنولیت آن را به ترتیب ۳۷ و ۷۰ درصد نسبت به عدم تنش خشکی افزایش داد (جدول ۶). مقایسه میانگین اثر ژنولیت نیز حاکی

غلظت کل قندهای محلول: مقایسه میانگین‌ها نشان داد که تنش خشکی افزایش معنی‌دار میزان قندهای محلول را در پی داشت به طوری که در شرایط عدم استفاده از ژنولیت دو سطح تنش خشکی متوسط و

آنزیم کاتالاز نیز مثبت و معنی‌دار بود که بر این اساس میزان فعالیت این آنزیم با اعمال تنش متوسط و شدید در شرایط عدم استفاده از ژئولیت به ترتیب افزایش ۴۹ و ۹۲ درصدی و در شرایط استفاده از ژئولیت سبب افزایش ۴۴ و ۶۱ درصدی فعالیت آنزیم کاتالاز شد (جدول ۶). استفاده از ژئولیت در شرایط مختلف آبی سبب کاهش معنی‌دار و به طور متوسط ۱۵ درصدی فعالیت آنتی اکسیدان کاتالاز گردید که با افزایش سطح تنش بر میزان کارایی ژئولیت در کاهش فعالیت این آنزیم افزوده شد به طوری که در شرایط عدم تنش اختلاف بین کاربرد و عدم کاربرد ژئولیت از نظر فعالیت آنزیم مذکور دیده نشد ولی در تنش متوسط و شدید کارایی ژئولیت در کاهش فعالیت کاتالاز معنی‌دار به ترتیب ۸ و ۲۵ درصد بود (جدول ۶). در بین ژنوتیپ‌ها نیز دو رقم Anatol و GK305 به ترتیب بالاترین فعالیت آنزیم پراکسیداز و کاتالاز را داشتند و جالب این‌که از لحاظ پایداری عملکرد نیز دو ژنوتیپ مذکور بالاترین میزان را در مواجهه با تنش خشکی به خود اختصاص دادند (شکل ۲).

سنجش میزان مالون دی آلدئید: نتایج نشان داد که تنش متوسط و شدید آبی در شرایط عدم استفاده از ژئولیت منجر به افزایش ۵۸ و ۱۱۶ درصدی و در شرایط استفاده از ژئولیت سبب افزایش ۴۰ و ۷۶ درصدی غلظت این ماده گردید. (جدول ۶). استفاده از ژئولیت به طور میانگین سبب کاهش ۱۷ درصدی این ماده گردید که بر اساس نتایج در تیمار عدم تنش خشکی، استفاده از ژئولیت تاثیر معنی‌داری بر غلظت مالون دی آلدئید نداشت و تنها سبب افزایش ۲ درصدی آن شد ولی در تیمارهای تنش متوسط و شدید آبی استفاده از ژئولیت به ترتیب سبب کاهش ۱۲ و ۲۲ درصدی این ماده گردید (جدول ۶).

محتوای نسبی آب برگ: اعمال تنش خشکی سبب کاهش معنی‌دار محتوای نسبی آب برگ گردید. در

از کاهش معنی‌دار (به طور متوسط ۱۳ درصد) غلظت قندهای محلول در اثر استفاده از این ماده بود ولی این کاهش در سطوح مختلف تنش خشکی متفاوت بود به طوری که غلظت کل قندهای محلول در سطوح عدم تنش، تنش متوسط و تنش شدید آبی به ترتیب ۳، ۱۳ و ۱۹ درصد کاهش یافت. نکته قابل ذکر این‌که در دو سطح عدم تنش و تنش متوسط تکراربرد ژئولیت اثر معنی‌داری بر غلظت کل قندهای محلول نداشت (جدول ۶).

میزان پرولین: افزایش محدودیت آبی سبب افزایش معنی‌دار میزان پرولین گردید و در شرایط عدم کاربرد ژئولیت میزان پرولین در اثر تنش خشکی متوسط و شدید نسبت به عدم تنش خشکی به ترتیب ۷۰ و ۳۲۹ درصد و در شرایط کاربرد ژئولیت به ترتیب ۷۲ و ۲۷۲ درصد افزایش یافت (جدول ۶). بررسی اثر ژئولیت بر این صفت نیز نشان داد که استفاده از این ماده به طور متوسط منجر کاهش معنی‌دار ۱۹ درصدی پرولین در کلزا شد که این کاهش در شرایط عدم تنش، تنش متوسط و شدید آبی به ترتیب ۱۲، ۶۴ و ۴۸ درصد بود (جدول ۶).

فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان: بروز تنش‌های متوسط و شدید آبی در شرایط استفاده از ژئولیت سبب افزایش ۱۱۴ و ۲۱۳ درصدی و در شرایط عدم استفاده از ژئولیت سبب افزایش ۵۷ و ۱۱۹ درصدی فعالیت آنزیم پراکسیداز گردید (جدول ۶). استفاده از ژئولیت به صورت میانگین سبب کاهش ۱۵ درصدی فعالیت آنزیم پراکسیداز شد ولی بررسی اثر ژئولیت بر این صفت در سطوح تنش خشکی نشان می‌دهد که در دو سطح تنش متوسط و شدید استفاده از ژئولیت منجر به کاهش معنی‌دار و به ترتیب ۱۸ و ۲۲ درصدی فعالیت این آنزیم گردید ولی در شرایط عدم تنش اختلاف بین شرایط استفاده و عدم استفاده از ژئولیت معنی‌دار نبود (جدول ۶). اثر تنش خشکی بر فعالیت

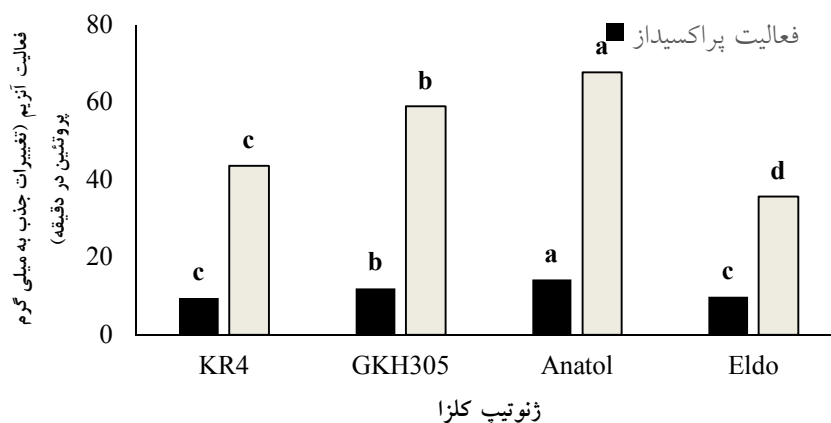
در مورد این صفت به صورت میانگین افزایش ۱۲ درصدی را به دنبال داشت که میزان این افزایش در مورد سطوح مختلف تنش خشکی متفاوت و در شرایط عدم تنش ۵ درصد، در شرایط تنش متوسط ۱۳ درصد و در شرایط تنش شدید ۲۰ درصد بود (جدول ۶).

تیمار عدم استفاده از ژنوتیپ محتوای نسبی آب برگ در شرایط تنش متوسط و شدید آبی نسبت به شرایط عدم تنش کاهش ۱۶ و ۳۳ درصدی را نشان می‌دهد. همچنین در تیمار استفاده از ژنوتیپ تنش‌های متوسط و شدید آبی، محتوای نسبی آب برگ با کاهش ۱۰ و ۲۳ درصدی مواجه گردید (جدول ۶). تاثیر ژنوتیپ

جدول ۶: تجزیه واریانس برخی صفات ژنوتیپ‌ها مختلف کلزا تحت تاثیر سطوح مختلف تنش خشکی و کاربرد ژنوتیپ*

میانگین مربعات							تیمار	درجه آزادی
میزان نسبی آب برگ (%)	میزان مالون دی‌آلدئید (میکرومول در گرم ماده خشک)	فعالیت کاتالاز (تغییرات جذب به میلی گرم پروتئین در دقیقه)	فعالیت پراکسیداز (تغییرات جذب به میلی گرم پروتئین در دقیقه)	میزان پرولین (میکرومول بر گرم وزن تازه)	میزان کل فندهای محلول (میلی‌گرم بر گرم وزن خشک)			
۸۹/۶۳ b	۰/۴۵۸ d	۳۴/۷۵ e	۵/۹۱ e	۱/۵۴ e	۱۲۰/۸d	عدم تنش	عدم کاربرد	
۷۵/۰۵ d	۰/۷۲۵ b	۵۱/۸۲ c	۱۲/۷ c	۲/۶۲ c	۱۸۴/۹ b	تنش متوسط	کاربرد	
۶۰/۳۰ f	۰/۹۹۰ a	۸۲/۸۴ a	۱۸/۵۱ a	۶/۶۲ a	۲۴۴/۶ a	تنش شدید	ژنوتیپ	
۹۴/۱۲ a	۰/۴۳۵ d	۳۳/۳۳ e	۶/۶۲ e	۱/۳۵ e	۱۱۶/۹ d	بدون تنش	عدم کاربرد	
۸۴/۷۱ c	۰/۶۰۸ c	۴۷/۸۸ d	۱۰/۳۸ d	۲/۳۲ d	۱۶۰/۶ c	تنش متوسط	کاربرد	
۷۲/۱۲ e	۰/۷۶۸ b	۶۲/۴۳ b	۱۴/۵۱ b	۵/۰۳ b	۱۹۸/۶ b	تنش شدید	ژنوتیپ	

*ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، دارای تفاوت معنی دار در سطح احتمال یک درصد در آزمون چند دامنه‌ای دانکن نمی‌باشند.



شکل ۲: مقایسه آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز در ژنوتیپ‌های کلزای مورد آزمایش

در مورد هر صفت، ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال ۵ درصد در آزمون چند دامنه‌ای دانکن دارای تفاوت معنی دار نمی‌باشند.

ژنوتیپ، به ترتیب ۲/۶ و ۴/۵ برابر و در تیمار استفاده از ژنوتیپ به ترتیب ۳ و ۴/۵ برابر بود (جدول ۷). استفاده از ژنوتیپ به طور متوسط سبب کاهش ۱۲ درصدی مقاومت روزنه‌ای گردید که این کاهش

مقاومت روزنه‌ای: مقاومت روزنه‌ای در اثر بروز تنش خشکی افزایش معنی دار یافت به طوری که میزان مقاومت روزنه‌ای در دو سطح تنش متوسط و شدید آبی نسبت به عدم تنش، در تیمار عدم مصرف

درصد افزایش و بیشترین تاثیر تنش شدید در رقم GKH305 با ۴۹ درصد افزایش دیده شد. بیشترین تاثیر مثبت ژئولیت بر کاهش درجه حرارت در شرایط عدم تنش و تنش شدید در لاین KR4 (به ترتیب با ۱۷ و ۱۳ درصد افزایش) و در شرایط تنش متوسط در رقم Anatol (با ۸/۷ درصد افزایش) مشاهده گردید (جدول ۷).

درصد روغن: بر اساس نتایج، تنش خشکی سبب کاهش معنی‌دار درصد روغن گردید و در شرایط عدم استفاده از ژئولیت، درصد روغن از ۴۳/۴ درصد در تیمار عدم تنش، به ۴۱ درصد در تیمار تنش متوسط و ۳۸/۲ درصد در تیمار تنش شدید رطوبتی کاهش یافت. همچنین در صورت استفاده از ژئولیت، درصد روغن از ۴۴/۵ درصد در شرایط عدم تنش، به ترتیب به ۴۲/۷ و ۳۹/۰ درصد در شرایط تنش متوسط و شدید رطوبتی رسید (جدول ۷). استفاده از ژئولیت سبب شد تا درصد روغن در همه سطوح تنش خشکی با افزایش مواجه گردد که میانگین این افزایش ۳/۲ درصد بود، به طوری که درصد روغن که در تیمار عدم استفاده از ژئولیت به ترتیب ۴۳/۴، ۴۱/۰ و ۳۸/۲ درصد برای تیمارهای عدم تنش، تنش متوسط و تنش شدید رطوبتی متغیر بود، در صورت استفاده از ژئولیت به ترتیب به ۴۴/۵، ۴۲/۷ و ۳۹/۰ درصد رسید (جدول ۷). در شرایط عدم تنش، بالاترین درصد روغن در لاین KR4 و رقم GKH305 و در شرایط تنش خشکی متوسط و شدید رقم Anatol مشاهده گردید. شدیدترین اثر تنش متوسط و شدید خشکی به ترتیب در لاین KR4 (۵/۸ درصد کاهش) و رقم GKH305 (۱۳/۲ درصد کاهش) دیده شد. مطالعه اثر مثبت ژئولیت بر درصد روغن دانه نیز نشان داد که بالاترین تاثیر افزایشی ژئولیت بر این صفت در شرایط عدم تنش و تنش شدید به لاین KR4 (به ترتیب با افزایش ۵/۳ درصد و ۳/۹ درصد) و در شرایط تنش

مقاومت در سطوح مختلف تنش خشکی متفاوت و به ترتیب برای سطوح عدم تنش، تنش متوسط و شدید آبی ۷/۱، ۱۹/۵ و ۸/۶ درصد بود (جدول ۷). کمترین مقاومت روزنه‌ای در شرایط عدم تنش در رقم GKH305 و در شرایط تنش متوسط و شدید آبی در رقم Anatol مشاهده شد. همچنین بیشترین افزایش مقاومت روزنه‌ای در اثر تنش خشکی در اثر هر دو سطح تنش خشکی شامل تنش متوسط و تنش خشکی در رقم GKH305 دیده شد. بیشترین تاثیر ژئولیت در کاهش هدایت روزنه‌ای در شرایط عدم تنش و تنش شدید آبی در لاین KR4 (به ترتیب با کاهش ۱۲ و ۱۱ درصدی) و در شرایط تنش متوسط آبی در لاین Eldo دیده شد (جدول ۷).

درجه حرارت سایه‌انداز گیاهی: مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بروز تنش خشکی در تمام ژنوتیپ‌های مورد بررسی سبب افزایش درجه حرارت سایه‌انداز گیاهی گردید به طوری که در شرایط عدم استفاده از ژئولیت این افزایش درجه حرارت در مورد تنش متوسط و شدید آبی نسبت به عدم تنش به ترتیب ۲۵ و ۴۷ درصد افزایش نشان داد، اما در شرایط استفاده از ژئولیت اعمال دو تنش متوسط و شدید، دمای سایه‌انداز گیاهی به ترتیب کاهش ۱۹ و ۴۴ درصدی یافت (جدول ۷). همچنین استفاده از ژئولیت به صورت میانگین منجر به کاهش ۸ درصدی درجه حرارت سایه‌انداز گیاهی گردید که این میزان کاهش درجه حرارت در شرایط عدم تنش، تنش متوسط و تنش شدید به ترتیب ۹/۶، ۶/۲ و ۷/۹ درصد بود (جدول ۷). پاسخ درجه حرارت سایه‌انداز گیاهی به تنش خشکی در ژنوتیپ‌های مختلف متفاوت بود. بالاترین دمای سایه‌انداز گیاهی در شرایط عدم تنش در رقم Anatol در شرایط تنش متوسط در لاین Eldo و در شرایط تنش شدید در دو رقم Anatol و GKH305 دیده شد. بیشترین تاثیر تنش متوسط بر درجه حرارت سایه‌انداز گیاهی در لاین Eldo با ۲۴

متوسط به لاین Eldo (افزایش ۴/۵ درصد) مربوط بود (جدول ۷).
 عملکرد دانه و روغن: بر اساس نتایج مقایسه میانگین کاهش عملکرد دانه در اثر بروز تنش خشکی بسیار شدید بود با این حال مصرف زئولیت، شدت خسارت را تا حدودی کاهش داد. بر این اساس در تیمار عدم مصرف زئولیت، میزان خسارت تنش‌های متوسط و شدید آبی به ترتیب ۶۴ و ۸۸ درصد و در تیمار مصرف زئولیت به ترتیب ۵۴ و ۸۴ درصدی در اثر تنش متوسط و تنش شدید آبی بود (جدول ۷).

جدول ۷: مقایسه میانگین اثر کاربرد زئولیت بر برخی صفات کلزا در سطوح مختلف تنش خشکی*

میانگین*						
ژنوتیپ کلزا	تنش × زئولیت**	مقاومت روزنه‌ای (میکرومول بر متر مربع بر ثانیه)	درجه حرارت سایه انداز گیاهی (°C)	مقدار روغن (%)	عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)	عملکرد روغن (کیلوگرم در هکتار)
KR4	Z ₁ × S ₀	۱/۵۱ f	۱۶/۰۳ r	۴۵/۴ a	۵۹۲۰/۳ a	۲۶۸۸۷ a
	Z ₀ × S ₀	۱/۷۲ i	۱۸۷۷ m	۴۳/۱ g	۴۲۲۳/۷ f	۱۸۲۱/۵ f
	Z ₁ × S ₁	۴/۰۸ h	۲۰/۹۷ i	۴۲/۴ i	۲۴۱۳/۷ i	۱۰۲۳/۰ i
	Z ₀ × S ₁	۴/۸۹ fg	۲۱/۶۳ h	۴۱/۰ k	۱۵۱۰/۷ k	۶۱۹/۷ k
	Z ₁ × S ₂	۶/۸۸ d	۲۳/۷۷ e	۳۹/۴ m	۷۹۸/۳ mn	۳۱۱/۴ lm
	Z ₀ × S ₂	۷/۷۷ a	۲۶/۷۷ a	۳۸/۰ q	۳۲۳/۳ p	۱۲۲/۸ o
GKH305	Z ₁ × S ₀	۱/۵۴ f	۱۶/۴۳ q	۴۴/۶ b	۵۴۹۵/۰ b	۲۴۵۰/۴ b
	Z ₀ × S ₀	۱/۶۱ if	۱۸/۰۷ n	۴۳/۹ d	۴۷۶۱/۷ d	۲۰۹۰/۹ d
	Z ₁ × S ₁	۳/۹۸ h	۲۰/۴۳ k	۴۲/۶ h	۲۵۷۸/۷ h	۱۱۰۲/۳ h
	Z ₀ × S ₁	۴/۹۹ ef	۲۱/۸۷ g	۴۰/۹ k	۱۴۲۳/۳ k	۵۸۲/۸ k
	Z ₁ × S ₂	۶/۹۷ d	۲۴/۷۷ d	۳۸/۷ o	۸۵۳/۷ lmn	۳۳۰/۰ lm
	Z ₀ × S ₂	۷/۴۹ bc	۲۶/۶۰ b	۳۸/۲ p	۵۰۱/۷ o	۱۹۱/۴ n
Anatol	Z ₁ × S ₀	۱/۵۷ if	۱۶/۶۰ p	۴۴/۱ c	۵۳۸۱/۳ bc	۲۳۷۳/۲ c
	Z ₀ × S ₀	۱/۶۷ if	۱۸/۶۷ m	۴۳/۲ fg	۴۴۶۴/۷ e	۱۹۳۰/۲ e
	Z ₁ × S ₁	۳/۹۲ h	۱۹/۹۳ l	۴۳/۳ f	۳۰۰۹/۷ g	۱۳۰۳/۱ g
	Z ₀ × S ₁	۴/۸۱ g	۲۱/۶۷ h	۴۱/۵ j	۱۹۳۸/۰ j	۸۰۴/۱ j
	Z ₁ × S ₂	۶/۹۰ d	۲۳/۷۰ e	۳۹/۰ n	۹۴۹/۰ l	۳۷۰/۶ l
	Z ₀ × S ₂	۷/۴۱ c	۲۶/۲۳ c	۳۸/۶ o	۷۳۴/۳ n	۲۸۳/۷ m
Eldo	Z ₁ × S ₀	۱/۵۷ if	۱۶/۷۳ o	۴۴/۰ d	۵۳۹۳/۷ c	۲۳۲۶/۹ c
	Z ₀ × S ₀	۱/۶۶ if	۱۸/۱۷ n	۴۳/۵ e	۴۴۷۹/۰ e	۱۹۵۰/۴ e
	Z ₁ × S ₁	۳/۹۵ h	۲۰/۸۳ j	۴۲/۵ h	۲۴۷۳/۷ hi	۱۵۰۲/۲ hi
	Z ₀ × S ₁	۵/۱۲ e	۲۲/۴۳ f	۴۰/۷ l	۱۳۹۱/۰ k	۵۶۶/۱ k
	Z ₁ × S ₂	۶/۹۰ d	۲۴/۶۷ d	۳۸/۹ n	۹۰۴/۷ lm	۳۵۲/۲ l
	Z ₀ × S ₂	۷/۶۰ b	۲۶/۶۷ ab	۳۸/۱ p	۴۰۳/۷ op	۱۵۳/۹ no

*. در هر ستون تیمارهای دارای حداقل یک حرف مشترک، اختلاف معنی داری با هم ندارند (دانکن ۵ درصد).

** Z₁ و Z₀ به ترتیب عدم کاربرد زئولیت و کاربرد زئولیت و S₀، S₁ و S₂ به ترتیب عدم تنش، تنش متوسط و تنش شدید خشکی.

شرایط عدم تنش، بالاترین عملکرد روغن را رقم GK305 تولید نمود، حال آن‌که در دو سطح تنش متوسط و شدید آبی، رقم Anatol بالاترین عملکرد روغن را به خود اختصاص دادند. در رابطه با اثر خسارت تنش خشکی بر عملکرد روغن، لاین KR4 به ترتیب با ۶۴ و ۹۰ درصد خسارت در تنش‌های متوسط و شدید، در بدترین وضعیت قرار داشت. تاثیر مثبت ژئولیت بر عملکرد روغن دانه در سطوح مختلف آبی و ژنوتیپ‌های مختلف متفاوت بود که بالاترین اثر مثبت کاربرد این ماده در شرایط عدم تنش و تنش شدید آبی در لاین KR4 (به ترتیب افزایش ۴۸ و ۱۵۴ درصدی) و در شرایط تنش متوسط در رقم GK305 (افزایش ۸۹ درصدی) دیده شد (جدول ۷).

بحث

نتایج این آزمایش نشان داد که اعمال تنش خشکی سبب افزایش محدودیت دسترسی به آب و به دنبال آن کاهش رطوبت نسبی برگ و افزایش درجه حرارت داخل سایه‌انداز گیاهی گردید. بروز تنش منجر به بسته شدن روزنه‌ها و افزایش مقاومت روزنه‌ای، همچنین افزایش غلظت قندهای محلول و اسیدآمین پرولین و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کاتالاز و پراکسیداز و میزان مالون‌دی‌آلدئید گردید و در نهایت کاهش عملکرد دانه و روغن به صورت معنی‌دار شد.

اثر معنی‌دار تنش بر افزایش درجه حرارت سایه‌انداز گیاهی در سایر مطالعات نیز گزارش گردیده است (Pasban Eslam, 2014). تنش خشکی و به دنبال آن افزایش دمای سایه‌انداز گیاهی، از طریق افزایش مقاومت روزنه و کاهش ورود دی‌اکسید کربن به داخل برگ، بر میزان فتوسنتز اثر منفی دارد (Jensen et al., 2007). طبق نتایج حاصل از پژوهش حاضر افزایش مقاومت روزنه‌ای در اثر تنش خشکی،

استفاده از ژئولیت به صورت معنی‌دار سبب افزایش عملکرد دانه گردید که بر اساس نتایج تاثیرگذاری آن بر عملکرد دانه با افزایش شدت تنش خشکی افزایش یافت به طوری که استفاده از ژئولیت در شرایط عدم تنش، تنش متوسط و شدید آبی عملکرد را به ترتیب ۲۳، ۶۷ و ۷۸ درصد افزایش داد (جدول ۷). براساس نتایج حاصل، در شرایط عدم تنش خشکی، رقم GK305 و در شرایط تنش متوسط و شدید آبی رقم Anatol بالاترین عملکرد دانه را داشتند. همچنین با این‌که تمامی ژنوتیپ‌ها در مواجهه با تنش‌های آبی کاهش عملکرد دانه داشتند، ولی شدت تنش خسارت در ژنوتیپ‌های مختلف متفاوت بود و بالاترین کاهش عملکرد در اثر تنش متوسط به لاین KR4 و رقم GK305 (با ۶۱ درصد کاهش) و در اثر تنش شدید به لاین KR4 (با ۸۹ درصد کاهش) اختصاص یافت. میزان تاثیر ژئولیت نیز در سطوح مختلف تنش بر عملکرد دانه ژنوتیپ‌های مختلف متفاوت بود و بالاترین کارایی ژئولیت در عدم تنش و تنش شدید آبی در لاین KR4 (به ترتیب افزایش ۴۰ و ۱۴۴ درصدی) و در تنش متوسط در رقم GK305 (افزایش ۸۲ درصدی) مشاهده شد (جدول ۷).

در تیمار عدم استفاده از ژئولیت، میزان خسارت در دو تنش متوسط و شدید طوبتی بر عملکرد روغن به ترتیب ۶۷ و ۹۰ درصد و در تیمار استفاده از ژئولیت میزان عملکرد روغن تحت دو تنش متوسط و شدید آبی نسبت به عدم تنش به ترتیب ۵۴ و ۸۶ درصد کاهش یافت (جدول ۷). کاربرد ژئولیت با افزایش ۴۱ درصدی عملکرد روغن کلزا، اثر مثبت و معنی‌داری بر این صفت داشت. با این حال میزان این تاثیر مثبت در شرایط مختلف آبی، متفاوت و به ترتیب ۲۶، ۷۴ و ۸۱ درصد برای تیمارهای عدم تنش، تنش متوسط و تنش شدید آبی بود (جدول ۷). همچنین در

حساسیت آن تیمار به تنش خشکی می‌باشد که سعی می‌کند با افزایش پرولین، تحمل خود را به تنش خشکی بالا ببرد. در مورد افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز در اثر تنش خشکی، Tohidi Moghadam and Mazaheri, 2012، در بررسی واکنش سویا به سطوح تنش کم‌آبی گزارش کردند که در شرایط تنش خشکی به دلیل تولید گونه‌های فعال اکسیژن، فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز و گلوٹاتیون پراکسیداز افزایش یافته و این مواد، رادیکال‌های سمی را کنترل می‌کنند. البته 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 (Farooq et al., 2009).

عنوان شده است میزان مالون دی‌آلدئید در شرایط تنش کم‌آبی افزایش می‌یابد اما میزان افزایش در ارقام متحمل گیاه *Macrotyloma uniflorum* بسیار کمتر از ارقام حساس است (Bhardwaj and Yadav, 2012). همچنین Sayfzadeh and Rashidi (۲۰۱۱) در بررسی واکنش ارقام چغندر قند به سطوح تنش کم‌آبی از نظر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی اعلام داشتند که تنش کم‌آبی به واسطه تولید گونه‌های فعال اکسیژن سبب ایجاد تنش اکسیداتیو و خسارت به غشای سلولی شده که منجر به تولید مالون دی‌آلدئید در گیاهان می‌گردد. بررسی‌های Rashidi و همکاران (۲۰۱۲) نشان داد که قطع آبیاری از مرحله گل‌دهی به بعد سبب افزایش چمشگیر و سریع میزان مالون‌دی‌آلدئید در ارقام مورد بررسی کلزا و بخصوص ارقام حساس به کم‌آبی شد. در تحقیقات بر روی آفتابگردان مشخص شد که محتوای نسبی آب برگ نیز که شاخص ارزیابی وضعیت آبی گیاه است، در اثر اعمال

گرچه با هدف کاهش هدر رفت آب صورت می‌گیرد، اما به دلیل ممانعت از ورود CO₂ می‌تواند فتوسنتز را به کمتر از نقطه جبرانی کاهش دهد (Siosehmardeh et al., 2004). بسته شدن روزنه‌ها برای مدت طولانی می‌تواند به تخریب کلروپلاست و افزایش دمای برگ منجر شده، به دلیل کاهش تثبیت CO₂ و افت میزان فتوسنتز، تولید آسمیلات مورد نیاز برای رشد و عملکرد گیاهان کاهش می‌یابد (Mafakheri et al., 2010). Mujdeci و همکاران (۲۰۱۱) نیز گزارش کردند که پتانسیل ماتریک بالا در خاک تاثیر به سزایی در افزایش مقاومت روزنه‌ای گیاه دارد. همچنین بر اساس نتایج تحقیقات صورت گرفته قندهای محلول می‌توانند نقش مهمی در تنظیم اسمزی سلول‌ها ایفا نمایند. گیاهان از طریق تجمع مقدار زیادی مواد محافظت‌کننده اسمزی مانند قندهای محلول، تنش‌های آبی و شوری را تحمل می‌کنند (Shubhra et al., 2004). این نتایج نتایج بدست آمده مبنی بر افزایش میزان پرولین در شرایط تنش خشکی توسط محققان دیگری نیز گزارش گردیده است که بر این اساس پرولین نقش محافظت‌کنندگی آنزیم‌های سیتوزولی (حفاظت از آنزیم کربوکسیلاز) و ساختار سلولی را بر عهده دارد. انباشت پروتئین در تنش خشکی ناشی از اکسیداسیون آن، اتصال و ترکیب ناقص آن در داخل مجموعه پروتئینی می‌باشد، لذا پرولین در شرایط تنش در سلول انباشت می‌شود (Mostajerani and Rahimi-Eichi, 2008). پرولین محلول، می‌تواند حلالیت پروتئین‌های مختلف را تحت تاثیر قرار داده و جلوی افزایش غیر طبیعی آلبومین را بگیرد. آنزیم‌ها نیز به دلیل ساختمان پروتئینی خود تحت تاثیر این ساز و کار پرولین قرار گرفته و محافظت می‌شوند که احتمالاً گیاهان به دلایل فوق پرولین خود را افزایش می‌دهند (Heydari Sharif Abad, 2001). البته وجود پرولین خصیصه منفی بشمار نمی‌رود و نشان‌دهنده

منجر به افزایش معنی‌دار درجه حرارت سایه‌انداز گیاهی گردید Fanaei و همکاران (۲۰۰۹) نیز گزارش کردند که ژئولیت و تنش خشکی با تاثیر بر سطح برگ و ارتفاع بوته، بر روی درجه حرارت سایه‌انداز گیاه کلزا تاثیر می‌گذارد. این محققین بیان کردند که ژئولیت با کاهش اثرات تنش خشکی سبب افزایش سطح برگ و در نهایت کاهش نفوذ نور به داخل سایه‌انداز گیاهی شده و باعث کاهش درجه حرارت سایه‌انداز گیاهی، همچنین کاهش مقاومت روزنه‌ای و کاهش درجه حرارت برگ می‌گردد. پیش از این نیز اثر مثبت ژئولیت در شرایط تنش خشکی بر روی عملکرد کدو پوست کاغذی (Naeemi et al., 2012)، کلزا (Zahedi et al., 2009)، آفتابگردان (Gholam Ghanbari et al., 2013) و نعنای (Hosseini et al., 2013) گزارش گردیده است.

نتیجه‌گیری نهایی

بر اساس نتایج تحقیق انجام شده، کاربرد ده تن ژئولیت در هکتار به دلیل خاصیت جذب، نگهداری و افزایش دسترسی به رطوبت در شرایط تنش کم‌آبی، موجب کاهش شدت و اثر زیان‌بار تنش در گیاهان و کاهش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی گردید. دلیل این امر فراهمی رطوبت حاصل از کاربرد ژئولیت در شرایط تنش از طریق ممانعت از هدر رفت انرژی و توان گیاه برای مقابله و سازگاری با تنش ایجاد شده از کمبود رطوبت بوده که منجر به افزایش عملکرد دانه و روغن گیاه گردید. بر این اساس، به نظر می‌رسد می‌توان با در نظر گرفتن نتایج به دست آمده از این تحقیق، با افزودن ۱۰ تن ژئولیت به خاک به عنوان راه‌کاری ارزان قیمت و در دسترس، از اثر منفی کمبود آب و تنش خشکی بر تولید گیاه زراعی کلزا کاست. در بین ژئوتیپ‌ها نیز بهترین ژئوتیپ در شرایط عدم تنش رقم GKH305 بود و در شرایط تنش برتری با رقم Anatol بود و دو لاین مورد

تنش کم‌آبی کاهش می‌یابد (Poormohammad Kiani et al., 2007).

کاهش عملکرد دانه و روغن کلزا در شرایط کمبود آب توسط سایر محققین گزارش گردیده است (Jabbari et al., 2015). تنش خشکی با کاهش سطح برگ، پیری زودرس برگ، کاهش انتقال مواد فتوسنتزی به دلیل افت پتانسیل فشار و کوتاه شدن دوره رشد زایشی برای گیاه، محدودیت منبع ایجاد و در طرف مقابل با افزایش سقط جنین در زمان گل‌دهی، کاهش تعداد بذر و کاهش تعداد و اندازه غلاف ایجاد محدودیت مخزن کرده و در مجموع با کاهش اجزاء عملکرد، از عملکرد نهایی می‌کاهد (Din et al., 2011; Ghasemyan et al., 2011). همکاران (۲۰۰۶) کاهش عملکرد محصول خردل در شرایط محدودیت آبیاری را در ارتباط با بسته شدن روزنه‌ها و کاهش سرعت و مقدار فتوسنتز دانسته‌اند.

در مورد اثر کاهشی ژئولیت بر غلظت فندهای محلول با نتایج بررسی سایر محققین در گیاه پنیرک مطابقت دارد (Ahmadi Azar et al., 2015). استفاده از ژئولیت در شرایط تنش کم‌آبی موجب کاهش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان گردید که دلیل آن افزایش فراهمی رطوبت و به تبع آن کاهش اثرات منفی تنش کم‌آبی در صورت مصرف ژئولیت بوده است. در این زمینه نیز Gholam Hoseini و همکاران (۲۰۱۳) به تاثیر مثبت ژئولیت در افزایش محتوی نسبی آب برگ آفتابگردان اذعان نمودند که دلیل آن را خاصیت برگشت‌پذیر جذب و دفع آب توسط ژئولیت دانستند. Ghasemyan Ardestani همکاران (۲۰۱۱) ضمن بررسی اثر تنش خشکی و پتاسیم بر درجه حرارت سایه‌انداز گیاهی ژئوتیپ‌های کلزا گزارش کردند که تنش با تاثیر منفی بر فتوسنتز و به دنبال آن کاهش تولید برگ سبب کاهش سطح برگ و نفوذ بیشتر نور به داخل سایه‌انداز گیاهی شده و در نهایت

برخوردار بودند.

آزمایش از توان تولیدی پایین‌تری در منطقه آزمایش

- and management. *Agronomy Sustainable*. 29 (1): 185-212.
- Ghaffari, G., Toorchi, M., Aharizad, S. and Shakiba, M.R. (2011).** Evaluation of traits related to water deficit stress in winter rapeseed cultivars. *Journal of Environmental Research and Technology*. 1 (2): 338-350.
- Ghanbari, A.A., Shakiba, M.R., Toorchi, M. and Choukan, R. (2013).** Morpho-physiological response of common bean leaf to water deficit stress. *European Journal of Experimental Biology*. 3 (1): 487-492.
- Ghasemyan Ardestani, H., Shirani Rad, A.H. and Zandi, P. (2011).** Effect of drought stress on some agronomic traits of two rapeseed varieties grown under different potassium rates. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 5 (12): 2875-2882.
- Gholam Hoseini, M., Ghalavand, A., Khodaei-Joghan, A., Dolatabadian, A., Zakikhani, H. and Farmanbar, H. (2013).** Zeolite-amended cattle manure effects on sunflower yield, seed quality, water use efficiency and nutrient leaching. *Soil and Tillage Research*. 126 (1): 193-202.
- Gholam Hoseini, M., Aghaalikhani, M., Khodaei-Joghan, A., Zakikhani, H. and Dolatabadian, A. (2012).** How zeolite controls nitrate leaching and modifies canola grain yield and quality. *Agricultural Research and Reviews*. 1 (4): 113-126.
- Hamed, A., Akbari, Gh.A., Khoshkholgh Sima, N. A., Shirani Rad, A.H., Jabbari, H. and Tabatabaee, S.M. (2014).** Evaluation of the agronomic characteristics and some physiological traits of canola varieties under drought stress. *Environmental Stresses in Crop Sciences*. 7(2): 155-171.
- Hatamvand, M., Hasanloo, T., Dehghan Nayeri, F., Shiranirad, A.H., Tabatabaei, S.A., Hosseini, S.M. (2014).** Evaluation of some physiological and biochemical indices of canola cultivars in
- References**
- Aebi, H. (1984).** Catalase in vitro. *Methods in Enzymology*. 105 (1): 121-126.
- Ahmadi Azar, F., Hasanloo, T., Imani, A. and Feiziasl, V. (2015).** Water stress and mineral zeolite application on growth and some physiological characteristics of Mallow (*Malva sylvestris*). *Plant research Journal*. 28 (3): 459-474.
- AOAC. (1995).** Official method of analysis (16th ed.). Arlington, VA., USA: AOAC.
- Ghasemyan Ardestani, H. and Shirani Rad, A.H. (2012).** Impact of regulated deficit irrigation on the physiological characteristics of two rapeseed varieties as affected by different potassium rates. *African Journal of Biotechnology*. 11(24):6510-6519.
- Bates, L.S., Waldren, R.P. and Teare, L.D. (1973).** Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*. 39 (1): 205-207.
- Bhardwaj, J. and Yadav, S.K. (2012).** Comparative study on biochemical parameters and antioxidant enzymes in drought tolerant and a sensitive variety of Horsegram (*Macrotyloma uniflorum*) under drought stress. *American Journal of Plant Physiology*. 7 (1): 17-29.
- Chance, B. and Maehly, A.C. (1955).** Assay of catalase and peroxidase. *Methods in Enzymology*. 2 (4): 764-817.
- Din, J., Khan S.U., Ali, I. and Gurmani, A.R. (2011).** Physiological and agronomic response of canola varieties to drought stress. *Journal of Animal and Plant Sciences*. 21 (1): 78-82.
- Fanaei, H.R., Galavi, M., Kafi, M. and Ghanbari Bonjar, A. (2009).** Amelioration of water stress by potassium fertilizer in two oilseed species. *International Journal of Plant Production*. 3 (2). 41-54.
- FAOSTAT, (2011).** Brassica napus. Retrieved April 5, 2016, from <http://www.faostat.fao.org>
- Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D. and Basra, S.M.A. (2009).** Plant drought stress: Effects, mechanisms

- contents in three chickpea cultivars. Australian Journal of Crop Science. 4(8): 580-585.
- Mandal, K.G., Hati, K.M., Misra, A.K. and Bandyopadhyay, K.K. (2006).** Assessment of irrigation and nutrient effects on growth, yield and water use efficiency of Indian mustard (*Brassica juncea*) in central India. Journal of Agriculture water management. 85 (3): 279-286.
- Mirzakhani, M. (2011).** Effect of drought stress and zeolite application on yield and yield components of winter safflower (*Carthamus tinctorius* L.). Plant Breeding and Agronomy Journal. 7 (3): 39-56.
- Moghaddam, M.J and Pourdad, S.S. (2011).** Genotype environment interactions and simultaneous selection for high oil yield and stability in rainfed warm areas rapeseed (*Brassica napus* L.) from Iran. Euphytica. 180: 321-335.
- Mostajerani, A. and Rahimi-Eichi, V. (2008).** Drought stress effects on root anatomical characteristics of rice cultivars (*Oryza sativa* L.). Pakistan Journal of Biological Science. 11(18): 2173-2183.
- Mujdeci, M., Senol, H., Cakmakci, T., Celikok, P. (2011).** The effects of different soil water matric suctions on stomatal resistance. Journal of Food, Agriculture and Environment. 9 (3&4):1027-1029.
- Naemi, M., Akbari, Gh.A., Shirani Rad, A.H., Hassanloo, T. and Akbari, Gh. A. (2012).** Effect of zeolite application and selenium spraying on water relations traits and antioxidant enzymes in medicinal pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) under water deficit stress conditions. Journal of Crops Improvement. 14 (1): 67-81.
- Omae, H., Kumar, A., Kashiviba, K., Shono, M. (2007).** Assessing drought tolerance of Snap bean (*Phaseolus vulgaris*) from genotypic differences in leaf water relations, shoot growth and photosynthetic parameters. Plant Production Science. 10(1):28-35.
- Parvizi, Y. and Nabati, E. (2004).** Effect of manure application and irrigation response to drought stress. Environmental Stresses in Crop Sciences. 7 (2): 173-185.
- Heath, R.L. and Pacher, L. (1968).** Photoperoxidation in isolated chloroplasts. I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. Archives of Biochemistry and Biophysics. 125 (1): 189-198.
- Heydari Sharif Abad, H. (2001).** The collation methods with drought and famine. Research Institute of forest and rangelands press. 171 P.
- Jabbari, H., Akbari, G.A., Khoshkholgh Sima, N.A., Shirani Rad, A.H., Alahdadi, I. and Tajodini, F. (2015).** Study of agronomical, physiological and qualitative characteristics of canola (*Brassica napus*) under water stress. Environmental Stresses in Crop Sciences. 8: 35-49.
- Jensen, C.R., Morgensen, V.O., Mortensen, G. and Fiedsedn, J.K. (2007).** Seed glucosinolate, oil and protein contents of field grown rape (*Brassica napus* L.) affected by solid drying and evaporative emend. Field Crops Research. 47 (1): 93-105.
- Khan, M.A., Ashraf, M.Y., Mujtaba, S.M., Shirazi, M.U., Khan, M.A., Shereen, A., Mumtaz, S., Siddiqui, M.A. and Kaler, G.M. (2010).** Evaluation of high yielding canola type *brassica* genotypes/ mutants for drought tolerance using Physiological indices as screening tool. Pakistan Journal of Botany. 42(6): 3807-3816.
- Kusvuran, S., (2011).** Effects of drought and salt stresses on growth, stomatal conductance, leaf water and osmotic potentials of melon genotypes (*Cucumis melo* L.). African Journal of Agricultural Research. 7 (5): 775-781.
- Ma, Q., Niknam, S.R. and Turner, D.W. (2006).** Responses of osmotic adjustment and seed yield of *Brassica napus* and *B.juncea* to soil water deficit at different growth stages. Australia Journal of Agricultural Research. 57(2): 221-226.
- Mafakheri, A., Siosemardeh, A., Bahramnejad, B., Struik, P.C. and Sohrabi, Y. (2010).** Effect of drought stress on yield, proline and chlorophyll

- biochemical parameters and gum content in cluster bean under water deficit. *Biological Plantrum*. 48(3): 445-448.
- Siosehmardeh, A., Ahmadi, A., Poustini, K. and Ebrahimzadeh, H. (2004).** Stomatal and nonstomatal limitations to photosynthesis and their relationship with drought resistance in wheat cultivars. *Iranian Journal of Agriculture Science*. 34 (4): 93-106.
- Tohidi Moghadam, H.R. and Mazaheri, A.H. (2012).** Study the use of different levels of cattle Manure and super absorbent on quantitative, qualitative, physiological and biochemical of soybean under drought stress. *Journal of Crop Production Research*. 3 (4): 375-398.
- Tohidi-Moghaddam, H.R., Shirani-Rad, A.H., Noormohammadi, G., Habibi, D. and Boojar, M.M.A. (2009).** Effect of super absorbent application on antioxidant enzyme activities in canola (*Brassica napus* L.) cultivars under water stress conditions. *American Journal of Agriculture and Biological Science*. 4 (3): 215-223.
- Tunturk, M. and Ciftci, V. (2007).** Relationships between yield and some yield components in rapeseed (*Brassica napus* L.) cultivars by using correlation and path analysis. *Pakistan Journal of Botany*. 39 (1): 81-84
- Vaziri, S. and A. Naderi. (2014).** Effect of superabsorbent application on grain yield and some physiological characters. *Iranian Journal of Field Crop Science*. 4 (3): 409-417.
- Zahedi, H., Noormohamaki, G., Shirani-Rad, A.H., Habibi, D. and Boojar, M. (2009).** The effect of Zeolite and foliar application of selenium on growth yield and yield components of three canola cultivars under drought stress. *World A Science Journal*. 1 (1): 255-262
- Zarei Siahbidi, A., RezaeZad, A. and Niazifard, A.Sh. (2014).** Effect of terminal drought stress on yield and yield components of some oilseed rape genotypes. *Seed and Plant Production Journal*. 30 (2): 297-314.
- interval on yield indices and water use efficiency in maize (*Zea mays* L.). *Pajouhesh and Sazandegi*. 63: 21-29.
- Pasban Eslam, B. (2014).** Study of some physiological indices, seed yield and its components of rapeseed varieties under drought stress. *Journal of Plant Production*. 20 (4): 149-162.
- Polat, E., Karaca, M., Demir, H. and Naci Onus, A. (2004).** Use of natural zeolite (Clinoptilolite) in agriculture. *Journal Fruit Ornamental Plant Research*. 12: 183 -189.
- 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.). *Theoretical and Applied Genetics*. 114 (2):193-207.
- Rashidi, S., ShiraniRad, A.H., Ayene Band, A., Javidfar, F. and Lak, S. (2012).** Study of relationship between droughts stresses tolerances with some physiological parameters in canola genotypes (*B. napus* L.). *Annals of Biological Research*. 3 (1): 564-569.
- Sayfzadeh, S. and Rashidi, M. (2011).** Response of antioxidant enzymes activities of sugar beet to drought stress. *ARPJ Journal of Agricultural and Biological Science*. 6 (4): 27-33.
- Shen, X., Zhou, Y., Duan, L., Li, Z., Enej, A.E. and Li, J. (2010)** Silicon effects on photosynthesis and antioxidant parameters of soybean seedlings under drought and ultraviolet-B radiation. *Plant Physiology*. 167 (15): 1248-1252.
- Shojaee, A.N., Delkhosh, B., Shirani Rad, A.H. and Noormohamadi, Gh. (2012).** Study the effect of K and zeolite on quantitative and qualitative yield of *Brassica rapa* under last season drought stress. *Crop Yield under Environmental Stresses Journal*. 4 (4): 1-61.
- Shubhra, J., Dayal, C.L., Gogswa, M.I. and Munjal, R. (2004).** Influence of phosphorus application on water relations,