فصلنامه علوم محیطی، دوره چهاردهم، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۵

۵۷-۷۲

اثر افزایش دی‌اکسید کربن، تنش خشکی و اشعهٔ فرابنفش بر برخی از صفات کمی و کیفی دو رقم کلزای پاییزه

حمیدرضا توحیدی مقدم[1*]، بهزاد ثانی[2]، حسینعلی شیبانی[1]و سیدعلی‌محمد مدرس ثانوی[3]

[1] دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ورامین-پیشوا، ورامین، ایران
[2] دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهر قدس، تهران، ایران
[3] دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۱/۲۳ تاریخ پذیرش: ۹۵/۷/۲۰

توحیدی مقدم، ح.ر.، ب. ثانی، ح. شیبانی و س.ع.م. مدرس ثانوی. ۱۳۹۵. اثر افزایش دی اکسید کربن، تنش خشکی و اشعهٔ فرا بنفش بر برخی از صفات کمی و کیفی دو رقم کلزای پاییزه. فصلنامه علوم محیطی. ۱۴(۳): ۷۲-۵۷.

سابقه و هدف: خشکی، تابش و افزایش غلظت دی‌اکسید کربن، سه تنش عمده محیطی هستند که امنیت غذایی بشر را تهدید می‌کنند. در دهه‌های اخیر تحقیقاتی در زمینه تاثیر هر یک از این سه عامل بر رشد و تولید گیاهان زراعی انجام شده است، اما تحقیقی که مشتمل بر اثر متقابل این سه عامل بر صفات کمی و کیفی کلزا باشد در دسترس نیست. بر این اساس این آزمایش با هدف بررسی اثرات سطوح مختلف آبیاری، دی‌اکسید کربن و اشعه فرابنفش بر دو رقم کلزای پاییزه آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح پایهٔ بلوک‌های کامل تصادفی در ۳ تکرار در سال ۱۳۹۲اجرا شد.

مواد و روش‌ها: در این آزمایش عامل اول دو رقم کلزای پاییزه شامل طلایه و اوکاپی، عامل دوم آبیاری در دو سطح آبیاری نرمال منطقه (شاهد یا عدم تنش کم‌آبی) و آبیاری به میزان ۶۰٪ ظرفیت مزرعه از ابتدای مرحلهٔ گل‌دهی تا انتهای آن، عامل سوم شامل دو سطح غلظت گاز دی‌اکسید کربن ۴۰۰ (غلظت موجود در طبیعت) و ۹۰۰ میکرومول بر مول هوا و عامل چهارم شامل سه طول موج تابش فرابنفش (طول موج‌های UV-A, B, C به ترتیب با شدت ۱۸, ۲۵ و ۴۰ میکروواط بر سانتی‌متر مربع) انتخاب شد. صفاتی نظیر تعداد خورجین در بوته، تعداد دانه در خورجین، وزن هزار دانه، عملکرد دانه و عملکرد روغن، میزان رنگدانه فلاونوئید، رنگدانه آنتوسیانین و میزان فلورسانس مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج و بحث: نتایج نشان داد که اثر آبیاری بر کلیه صفات به جز عملکرد روغن اثر معنی‌دار دارد. همچنین نتایج حاصل از این پژوهش حاکی از آن است که تنش خشکی سبب کاهش تعداد خورجین در بوته، تعداد دانه در خورجین، وزن هزار دانه، عملکرد دانه و میزان فلورسانس شد در حالی‌که سبب افزایش میزان رنگدانه‌های فلاونوئید و آنتوسیانین در گیاه شد. افزایش میزان سطح دی‌اکسید کربن نیز تنها بر تعداد خورجین در بوته، میزان فلاونوئید و آنتوسیانین معنی‌دار نبود. به‌طوری‌که افزایش میزان سطح دی‌اکسید کربن سبب افزایش وزن دانه‌ها، عملکرد دانه، عملکرد روغن و میزان فلورسانس گیاه شد. تاثیر اشعه فرابنفش بر کلیه صفات از نظر آماری معنی‌دار بود. در حالی‌که اشعه فرابنفش با سطوح پرانرژی‌تر سبب کاهش کلیه صفات آزمایشی به جز میزان فلاونوئید و آنتوسیانین‌ها شد. اثرات متقابل سه‌گانه آبیاری در دی‌اکسید کربن در اشعه فرابنفش نیز در سطح یک درصد بر عملکرد دانه و در سطح پنج درصد بر عملکرد روغن معنی‌دار شد. مقایسه میانگین‌های اثر متقابل سه‌گانه آبیاری در دی‌اکسید کربن در اشعهٔ فرابنفش نیز نشان داد که هم در شرایط آبیاری و هم تنش بالاترین میانگین عملکرد دانه در شرایطی به دست آمد که از غلظت ۹۰۰ ppm دی‌اکسید کربن و سطح تابش UVA استفاده شده بود.

نتیجه‌گیری: در مجموع نتایج این بررسی نشان داد که افزایش سطح دی‌اکسید کربن می‌تواند اثرات مخرب سطوح پرانرژی اشعه فرابنفش را بر وزن هزار دانه، عملکرد دانه، عملکرد روغن و میزان فلورسانس جبران کند و سبب افزایش این صفات شود.

واژه‌های کلیدی: کلزا، تنش خشکی، دی‌اکسید کربن، اشعهٔ فرابنفش، عملکرد دانه.

* Corresponding Author. *E-mail Address*: tohidi@iauvaramin.ac.ir

مقدمه

خشکی، تابش فرابنفش و افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن سه عامل عمده محیطی هستند که آینده غذایی بشر را تحت تأثیر قرار خواهند داد. خشکی مشکلی جهانی است که به‌طور جدی تولید و کیفیت گیاهان زراعی را تحت تأثیر قرار می‌دهد، و همراه با افزایش تغییرات آب‌وهوای جهان جدی‌تر می‌شود. افزایش دی‌اکسیدکربن و اشعهٔ فرابنفش هواسپهر، کاهش بارش های آسمانی و رطوبت خاک در آینده‌ای نزدیک قابل پیش‌بینی است. در بسیاری از نواحی، تغییر اقلیم نه تنها منجر به افزایش تنش خشکی و کاهش بارندگی می‌شود بلکه منجر به کاهش رطوبت هوا به دلیل افزایش درجه حرارت محیط نیز می‌شود (Lobell *et al.*, 2014). تنش خشکی یک محدودیت اصلی برای تولید گیاهان زراعی و کیفیت آنها محسوب می‌شود. بنابراین به جهت حفظ امنیت غذایی آینده، دانش ما در مورد تعامل بین میزان دی‌اکسید کربن و تنش خشکی روی گیاهان زراعی از اهمیت زیادی برخوردار است (Aljazairi *et al.*, 2015; Vandegeer *et al.*, 2013). غلظت‌های دی‌اکسید کربن اتمسفری از آغاز انقلاب صنعتی افزایش یافته است و انتظار می رودافزایش آن همراه با کمبود آب قابل‌استفاده همراه باشد. مشخص شده است که غلظت دی‌اکسید کربن اتمسفر طی دو قرن گذشته افزایش یافته است. همچنین در دیگر گزارش‌ها تخمین زده می‌شود که غلظت این گاز گلخانه‌ای بین ۵۴۰ تا ۹۷۰ میکرومول بر مول هوا تا سال ۲۰۱۰ افزایش خواهد یافت (IPCC, 2014). این میزان سبب افزایش رشد و کیفیت گیاهان زراعی شده است. علاوه بر آن، این افزایش سبب افزایش نرخ فتوسنتز گیاهان و همچنین کارایی مصرف آب از طرق کاهش اندازه روزنه‌ها شده است (Del Amor *et al.*, 2015). این افزایش در گیاهان سه‌کربنه، پتانسیل جذب دی‌اکسیدکربن فتوسنتزی خالص برگ را به طور قابل‌توجهی افزایش خواهد داد. این موضوع رشد گیاهی را تحت تأثیر قرار می‌دهد که در آزمایش‌ها و بررسی‌های مدل‌سازی‌شده متعددی اثبات شده است. به هر حال، پاسخ‌های گیاهی به افزایش دی‌اکسید کربن در نتیجه روابطی که به خوبی درک نشده و پاسخ‌های پیچیده و اساسی رشد و نمو به تغییرات دی‌اکسید کربن و دیگر شرایط محیطی، متفاوت است. این افزایش در نتیجهٔ مستقیم فعالیت‌های بشر و افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی و تغییر الگوهای کاربری اراضی است. تحقیقات نشان داده است که تحت افزایش میزان دی‌اکسید کربن عملکرد در نیشکر افزایش یافته است. اما فهم این موضوع مشکل است که این افزایش عملکرد ناشی از اثر افزایش مستقیم میزان دی‌اکسید کربن در سطح برگ‌ها و افزایش میزان فتوسنتز است یا اینکه ناشی از اثر غیرمستقیم آن در رابطه با کاهش تعرق و بهبود کارایی مصرف آب است (Stokes *et al.*, 2016). تحقیقات صورت‌گرفته در سائوپولو برزیل در شرایط مدل‌سازی ۷۵۰ ppm دی‌اکسید کربن نسبت به شرایط ۳۸۰ ppm به کار رفته در این تحقیق سبب افزایش ۱۰ درصدی عملکرد در نیشکر شد (Marin *et al.*, 2013). امروزه فعالیت‌های صنعتی بشر باعث افزایش ترکیبات آلوده‌کننده‌ی اتمسفر به خصوص ترکیبات هالوژن‌دار، شده است که این ترکیبات به دلیل پایداری زیادی که دارند به سطح استراتوسفر رسیده و باعث تخریب لایه ازن استراتوسفری می‌شوند. با توجه به اهمیت لایهٔ ازن در جلوگیری از تابش فرابنفش به سطح زمین، کاهش لایهٔ ازن باعث افزایش میزان تابش فرابنفش در سطح زمین شده و مشکلاتی را برای موجودات زنده به وجود آورده است (Buchholz *et al.*, 1995). سطوح اشعه فرابنفش UV-B که به سطح زمین می‌رسد در دههٔ اخیر به دلیل سوراخ شدن لایه ازن افزایش یافته است (Anonymous, 2011). علاوه بر این، در حوزهٔ مدیترانه کاهش در میزان ابرهای موجود احتمالاً موجب خواهد شد که گیاهان موجود در این اکوسیستم در مجموع جریان تشعشعات بالاتری از تشعشعات UV-A و UV-B را در آیندهٔ نزدیک دریافت کنند (IPCC, 2014). تحقیقات نشان داده است که تشعشع فرابنفش سبب افزایش رادیکال‌های آزاد اکسیژن از قبیل یون سوپراکسید، هیدروکسیل و هیدروژن پراکسید در دو رقم ماش شد که این امر سبب آسیب به لیپیدها و پراکسیداسیون آنها و نشت الکترولیت‌ها در دو رقم ماش شد (Dwivedi *et al.*, 2015). تحقیقات و بررسی‌هایی که روی گیاهان انجام شده نشان داده است که گیاهان در پاسخ به تابش فرابنفش محیط واکنش‌های متفاوتی نشان می‌دهند. بعضی از گیاهان مثل کدو، لوبیا و اسفناج نیوزلندی رشدشان توسط تابش فرابنفش بازداشته می‌شود در صورتی‌که بعضی دیگر مثل گوجه‌فرنگی رشدش تحریک می‌شود و بعضی مثل کتان و

جو نسبت به تابش فرابنفش بی‌تفاوت هستند. البته بعضی از این حساسیت‌های متفاوت مربوط به سازوکارهای حفاظتی در گیاهان مثل افزایش سنتز مواد جذب‌کننده تابش فرابنفش، بازتابش UV، افزایش ضخامت کوتیکول و افزایش ضخامت برگ است (Buchholz *et al.*, 1995). با توجه به تحقیقات صورت‌گرفته، هدف از اجرای این پژوهش، بررسی اثرهای احتمالاً مثبت افزایش دی‌اکسید کربن روی کلزا و بررسی اثرهای احتمالا منفی تنش رطوبت بوده که ممکن است با افزایش تیمار دی‌اکسید کربن کاهش یابد. از آنجا که تاکنون در ایران و جهان هیچ تحقیقی درباره اثر متقابل سه متغیر محیطی عمده (خشکی، اشعه فرابنفش و دی‌اکسید کربن) که آیندهٔ غذایی بشر را تحت تأثیر قرار می‌دهند در محیط مزرعه روی این گیاه مهم زراعی و روغنی انجام نشده است، تحقیق درباره این موضوع بسیار مهم به نظر می‌رسد.

مواد و روش‌ها

آزمایش در گلخانه تحقیقاتی در کرج با موقعیت ۵۱ درجه و ۸ دقیقه طول جغرافیایی و ۳۵ درجه و ۴۳ دقیقه عرض جغرافیایی و با ارتفاع ۱۲۱۵ متر از سطح دریا طی سال ۹۳-۱۳۹۲اجرا شد. از لحاظ آب‌وهوایی محل اجرای آزمایش در منطقهٔ نیمه‌خشک و معتدل قرار داشته و میانگین بارندگی سالانه آن ۲۴۷/۴ میلی‌متر است. در این آزمایش تاثیر تیمارهای گاز دی‌اکسید کربن، تابش فرابنفش روی دو رقم کلزای پاییزه تحت تأثیر تنش کم‌آبی و همچنین در حالت آبیاری کامل مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح پایهٔ بلوک‌های کامل تصادفی در ۳ تکرار و طی یک سال انجام شد. در این آزمایش عامل اول دو رقم کلزای پاییزه شامل طلایه و اوکاپی، عامل دوم آبیاری در دو سطح آبیاری معمول منطقه (شاهد یا عدم تنش کم‌آبی) و آبیاری به میزان ۶۰٪ ظرفیت مزرعه از ابتدای مرحله گل‌دهی تا انتهای آن، عامل سوم شامل دو سطح غلظت گاز دی‌اکسید کربن ۴۰۰ (غلظت موجود در طبیعت) و ۹۰۰ میکرومول بر مول هوا و عامل چهارم شامل سه طول موج تابش فرابنفش (طول موج‌های UV-A, B, C به ترتیب با شدت ۱۸، ۲۵ و ۴۰ میکروواوت بر سانتی‌متر مربع) انتخاب شد.

اجرای آزمایش با کشت کلزا در اواسط مهرماه صورت گرفت. ارقام کلزا در کرت‌هایی به طول ۲ متر و عرض ۱ متر در ۶ خط با فاصلهٔ خطوط ۳۰ سانتی‌متری و فاصلهٔ بوتهٔ ۴ سانتی‌متر کشت شد. ارقام شامل طلایه و اوکاپی از ژرم‌پلاسم‌های بخش تحقیقات گیاهان روغنی موسسهٔ تحقیقات اصلاح و تهیهٔ نهال و بذر کرج تهیه شد. منشأ رقم طلایه از کشور آلمان، دارای تیپ رشد زمستانه است. متحمل به سرما، مقاوم به خوابیدگی، حساس به تاریخ کاشت، دیررس با طول دورهٔ رشد ۲۴۰ تا ۲۵۰ روز است. درصد روغن دانه آن ۴۰ تا ۴۲درصد، وزن هزار دانه آن ۴ گرم بوده، از ارقام دوصفر بوده و عملکرد دانه آن بیش از سه تن در هکتار است. جایگاه زراعت آن نیز عمدتا در دو اقلیم معتدل سرد و سرد کشور است. منشأ رقم اوکاپی نیز کشور فرانسه، دارای تیپ رشد بینابین مقاوم به سرما، متوسطرس با طول دوره رشد ۲۳۰ تا ۲۴۰ روز است. درصد روغن آن ۴۳ تا ۴۵ درصد و وزن هزار دانه آن حدود ۴/۳ گرم با عملکرد دانه بیش از ۳ تن در هکتار است. جایگاه کشت آن عمدتاً در اقلیم معتدل سرد و سرد کشور است. عملکرد آن سه تن در هکتار است. کاشت به‌صورت جوی و پشته به روش هیرم‌کاری بوسیلهٔ نیروی کارگری (با دست) انجام شد. در طول دوره رشد کلیه عملیات وجین و کوددهی (بر اساس آزمون حاصل‌خیزی خاک) انجام شد. برای جلوگیری از مزاحمت علف‌های هرز، قبل از کاشت خاک مزرعه به وسیلهٔ علفکش ترفلان تیمار شد. قبل از شروع آبیاری، نمونه‌های خاک از عمق صفر تا ۲۰ و ۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متری کرت‌های آزمایشی تهیه و با استفاده از دستگاه پمپ فشاری میزان ظرفیت زراعی خاک تعیین شد و با آن به کمک عمق ریشه و چگالی خاک، عمق آب آبیاری تعیین و با داشتن مساحت هر کرت میزان آب لازم برای رسیدن به ظرفیت زراعی هر کرت تعیین شد. البته قبل از هر آبیاری میزان رطوبت خاک تعیین و با توجه به میزان تبخیر و تعرق میزان دقیق آب آبیاری تعیین شد. آنگاه با استفاده از کنتور و TDR میزان آب در حد تعیین‌شده به هر کرت داده شد. تمامی کرت‌های آزمایشی تا انتهای مرحلهٔ ساقه رفتن به‌طور یکسان و همزمان آبیاری شدند. از ابتدا تا اواخر گل‌دهی در حالی‌که تیمار شاهد در حد ظرفیت زراعی آبیاری شد، تیمار تنش خشکی با تغییر میزان آب آبیاری توسط کنتور طوری تنظیم شد که رطوبت خاک به ۶۰ درصد ظرفیت زراعی رسید. در این

دوره برای اعمال تیمار تابش فرابنفش از لامپ‌های زیر با دوره‌های روزانه ۶۰ دقیقه‌ای (از ساعت ۱۳:۰۰-۱۴:۰۰) با طول موج معین استفاده شد (UV-B Philips 40W/12; UV-C Philips TUV 30W/G30T8).

برای اعمال تیمار تابش UV-A از لامپ استفاده نشد. در اصل این تیمار، تیمار شاهد بود زیرا این طول موج به‌طور طبیعی در طبیعت وجود دارد و توسط لایهٔ ازن جذب نمی‌شود. لامپ‌ها در ۵۰ سانتی‌متری بالای بوته‌ها قرار گرفت و با افزایش ارتفاع بوته‌ها ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر تا بوته‌ها حفظ شد. شدت تابش فرابنفش طول موج‌های UV-A, B, C به ترتیب ۱۸, ۲۵ و ۴۰ میکروووات بر سانتی‌متر مربع بود که با دستگاه (Digital UV Indicator) مدل UV-3 ساخت شرکت سیباتای ژاپن اندازه‌گیری شد. همزمان با اعمال تنش کم‌آبی و تابش فرابنفش میزان غلظت گاز دی‌اکسید کربن نیز به میزان ۹۰۰ میکرومول بر مول هوا افزایش یافت. برای اعمال تیمار دی‌اکسید کربن روی کرت‌های مزبور یک چهارچوب قرار داده و با پلاستیک دور آن را پوشانده سپس با گاز دی‌اکسید کربن و به کمک حسگر الکترونیکی (ساخت کارخانهٔ Testo آلمان) غلظت درون هر کرت به میزان مورد نظر رسید. برای ایجاد شرایط یکسان برای تمام کرت‌ها از چهارچوب و پلاستیک استفاده شد.

برای تعیین صفاتی نظیر تعداد خورجین درگیاه، تعداد دانه در خورجین از هر کرت آزمایشی ۱۰ گیاه به‌طور تصادفی انتخاب شد و میانگین آنها به‌عنوان صفت مربوطه برای آن کرت آزمایشی منظور شد. سپس در این ۱۰ گیاه، تعداد خورجین در ساقه اصلی و تعداد خورجین در شاخه فرعی تعیین شد. از جمع این دو تعداد خورجین در گیاه محاسبه شد. همچنین تعداد دانه در خورجین های اصلی و فرعی شمارش شد و از میانگین آنها تعداد دانه در خورجین محاسبه شد. در زمان رسیدن کامل گیاه پس از حذف خطوط حاشیه هر کرت آزمایشی و نیم متر از ابتدا و انتهای آنها، بقیه بوته‌ها کف‌بر شده و چند روز در سطح کرت آزمایشی باقی گذاشته شد. سپس با استفاده از کمباین آزمایشات، دانه‌ها از داخل خورجین‌ها جدا شده و وزن دانه‌های هر کرت آزمایشی محاسبه شده و عملکرد دانه به‌دست آمد. سپس از داخل کیسه‌های محتوی دانه‌های هر کرت آزمایشی ۸ نمونه ۱۰۰ تایی به‌طور تصادفی انتخاب و وزن آنها محاسبه و از حاصل‌ضرب میانگین آنها در عدد ۱۰ وزن هزار دانه تعیین شد.

برای اندازه‌گیری فلاونوئیدها و آنتوسیانین‌ها، برگ‌ها قبل از آزمایش در نیتروژن مایع نگهداری شدند تا به خوبی پودر شوند. برای اندازه‌گیری میزان فلاونوئیدها و آنتوسیانین‌ها از روش Krizek *et al.* (1998) استفاده شد. برای اندازه‌گیری میزان فلورسانس نیز از دستگاه فلورومتر یا استرس‌متر (PAM-2000, H Wals (Gmb H, Effeltrich, Germany) استفاده شد. همچنین ماکزیمم کارایی واکنش‌های نوری فتوسیستم II از نسبت فلورسانس متغیر(Fv) به فلورسانس ماکزیمم (Fm) به‌دست آمد (Olsson *et al.*, 2000).

در این آزمایش، تجزیه‌های آماری اطلاعات جمع‌آوری‌شده با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS انجام گرفت. برای انجام مقایسه میانگین‌ها از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح پنج درصد استفاده شد.

نتایج و بحث

همان‌طور که در جدول تجزیه واریانس ۱ مشاهده می‌شود، اثر ساده رقم در سطح یک درصد بر تعداد خورجین در بوته، تعداد دانه در خورجین، وزن هزار دانه، عملکرد دانه و عملکرد روغن معنی‌دار شد اما بر محتوای فلاونوئیدها، آنتوسیانین‌ها و میزان فلورسانس معنی‌دار نشد. همچنین اثر ساده آبیاری در سطح یک درصد بر کلیه صفات مورد بررسی در این آزمایش به جز عملکرد روغن معنی‌دار شد. اثر ساده کاربرد دی‌اکسید کربن نیز در سطح یک درصد بر وزن هزار دانه، عملکرد دانه، عملکرد روغن و میزان فلورسانس گیاه و در سطح پنج درصد بر تعداد خورجین معنی‌دار شد اما اثر آن بر تعداد دانه در خورجین، محتوای فلاونوئیدها و آنتوسیانین‌ها معنی‌دار نشد. اثر ساده اشعهٔ فرابنفش نیز بر کلیهٔ صفات آزمایشی در سطح یک درصد معنی‌دار شد. اثرات متقابل سه‌گانه آبیاری در دی‌اکسید کربن در اشعه فرابنفش نیز در سطح یک درصد بر روی عملکرد دانه و در سطح پنج درصد بر روی عملکرد روغن معنی‌دار شد. تابش اشعه فرابنفش بر فرآیندهای زایشی مانند مورفولوژی و جوانه‌زنی دانه گرده موثر بوده سبب کاهش عملکرد دانه می‌شود (Correia *et al.*, 2005). در بین تیمارهای حاصل از آبیاری، دی‌اکسید کربن و اشعه فرابنفش، بیشترین عملکرد دانه مربوط به تیمار UVA بدون تنش خشکی و غلظت ۹۰۰ ppm بود. در حالی‌که کمترین عملکرد از تیمارUVB، غلظت ۴۰۰ ppm و تحت شرایط تنش خشکی حاصل شد.

جدول۱- جدول تجزیه واریانس صفات مورد بررسی دو رقم کلزا تحت شرایط تیمارهای مختلف آبیاری، دی‌اکسید کربن، اشعهٔ فرابنفش.

Table 1- Analysis of variance on some traits of two canola cultivars as affected by irrigation, carbon dioxide and ultra violet treatments.

تیمار Treatment	درجه آزادی df	خورجین در بوته Pod number per plant	دانه در خورجین Seed number per pod	وزن هزار دانه 1000-seed weight	عملکرد دانه Seed yield	عملکرد روغن Oil yield	فلاونوئید Flavonoid	آنتوسیانین Anthocyanin	میزان فلورسانس Fluorescence
تکرار Replicate	2	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
رقم Cultivar	1	**	**	**	**	**	ns	ns	ns
آبیاری Irrigation	1	**	**	**	**	ns	**	**	**
دی‌اکسید کربن Carbon dioxide	1	*	ns	**	**	**	ns	ns	**
فرابنفش Ultra violet	2	**	**	**	**	**	**	**	**
رقم×آبیاری Cultivar× Irrigation	1	ns	*	ns	**	ns	ns	ns	**
رقم ×دی‌اکسید کربن Cultivar× Carbon dioxide	1	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
فرابنفش رقم× Cultivar× Ultra violet	2	*	ns	**	**	ns	ns	ns	*
آبیاری× دی‌اکسید کربن Irrigation× Carbon dioxide	1	**	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns
آبیاری× فرابنفش Irrigation× Ultra violet	2	**	ns	*	*	**	**	*	**
دی‌اکسید کربن× فرابنفش Carbon dioxide× Ultra violet	2	ns	ns	*	ns	ns	ns	**	*
رقم×آبیاری×دی‌اکسید کربن Cultivar× Irrigation× Carbon dioxide	1	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
رقم×آبیاری× فرابنفش Cultivar× Irrigation× Ultra violet	2	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
آبیاری× دی‌اکسید کربن× فرابنفش Irrigation× Carbon dioxide× Ultra violet	2	ns	ns	ns	**	*	ns	ns	ns
رقم× دی‌اکسید کربن × فرابنفش Cultivar× Carbon dioxide× Ultra violet	2	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
رقم×آبیاری×دی‌اکسید کربن× فرابنفش Cultivar× Irrigation× Carbon dioxide× Ultra violet	2	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
خطا Error	46								
کل Total	71								
ضریب تغییرات CV		4.25	11.77	11.96	6.80	8.22	11.50	5.74	5.09

*، ** و ns به ترتیب معنی‌دار در سطح پنج درصد، یک درصد و فاقد اختلاف معنی‌دار

*, ** and ns significant at 0.05, 0.01 and no significant, respectively

تعداد خورجین در بوته

بالاترین میانگین تعداد خورجین در بوته مربوط به رقم اوکاپی بود. همچنین اثر ساده آبیاری نیز نشان داد که بالاترین میانگین تعداد خورجین در بوته با میانگین ۲۷۷/۷۵ خورجین در بوته مربوط به سطح آبیاری نرمال بود. در این رابطه تحقیقات محققان نشان داده است که کمبود رطوبت خاک بعد از شروع گل‌دهی عامل کاهش ۵۰ درصدی عملکرد است و علت اصلی این وضعیت را کاهش شدید تعداد غلاف در گیاه دانسته اند (Walton *et al.*, 2002).

همچنین بالاترین تعداد خورجین در بوته مربوط به سطح کاربرد ppm ۴۰۰ دی‌اکسید کربن بود. به‌نظر می رسد که کاهش تعداد خورجین در بوته در سطح کاربرد ppm ۹۰۰ به دلیل افزایش درجه حرارت و ریزش گل‌ها در مرحله گل‌دهی باشد. از طرفی دیگر مشاهده شد که بالاترین میانگین تعداد خورجین در بوته با میانگین ۲۸۸/۵ خورجین مربوط به سطح تابش UVA بود. به‌نظر می‌رسد که کاربرد اشعه‌های UVB و UVC سبب کاهش رشد ریشه و ساقه در اثر افزایش میزان اتیلن و در نهایت کاهش تعداد خورجین‌های تشکیل‌شده در هر گیاه شده است. از طرف دیگر کاربرد اشعه‌های UVB با انرژی بیشتر موجب جلو افتادن مرحله گل‌دهی در گیاه و کاهش آسیمیلات لازم برای توسعه ساختارهای زایشی گیاه می‌شود و از این طریق سبب ریزش گل‌ها و غلاف‌ها و کاهش تعداد غلاف در هنگام برداشت می‌شود (Marin *et al.*, 2013).

همچنین مقایسه میانگین‌های اثر متقابل سه‌گانه آبیاری در دی‌اکسید کربن در اشعهٔ فرابنفش نشان داد که هم در شرایط آبیاری و هم در شرایط تنش خشکی بالاترین میانگین تعداد خورجین در بوته در شرایطی به‌دست آمد که از غلظت ppm ۴۰۰ دی‌اکسید کربن و سطح تابش UVA استفاده شده بود. هر چند که اختلاف این تیمار با تیماری که در آن از ppm ۹۰۰ دی‌اکسید کربن و سطح تابش UVA استفاده شده بود از لحاظ آماری معنی‌دار نشد. در میان اشعه های مختلف فرابنفش طیف UVC بیشترین تأثیرات مخرب را دارد. در مجموع اشعه‌های پرانرژی طیف فرابنفش موجبات تخریب غشاهای سلولی و کاهش تقسیم سلولی و نرخ رشد می‌شود (Tanyolac *et al.*, 2007). افزایش در غظت دی‌اکسید کربن سبب بسته شدن روزنه‌ها شده و از میزان فتوسنتز و رشد گیاه می‌کاهد، لذا کاهش در تولید گل و در پی آن تعداد خورجین‌ها در اثر افزایش غلظت دی‌اکسید کربن قابل انتظار است. همچنین تابش اشعه‌های پرانرژی طیف فرابنفش منجر به عقیم شدن گل‌ها و افزایش ریزش آنها شده که به نوبه خود کاهش در تعداد خورجین‌ها در پی خواهد داشت.

تعداد دانه در خورجین

با توجه به جدول مقایسهٔ میانگین‌ها (جدول۲) مشاهده شد که بالاترین میانگین تعداد دانه در خورجین مربوط به رقم اوکاپی بود. همچنین اثر ساده آبیاری نیز نشان داد که بالاترین میانگین تعداد دانه در خورجین با میانگین ۲۱/۱۱۱ دانه در خورجین مربوط به سطح آبیاری نرمال بود. نتایج مطالعات پژوهشگران نیز نشان داد که تعداد دانه در غلاف کلزا از تنش خشکی متأثر شده به‌طوری‌که اعمال تنش خشکی موجب کاهش این تعداد می‌شود (Wright *et al.*, 1995). به‌طورکلی کاهش میزان آب حتی برای دوره کوتاه در زمان باز شدن گل‌ها، تعداد گل‌هایی را که به دانه تبدیل می‌شوند را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد. نتایج مشابهی مبنی بر کاهش تعداد دانه در غلاف گیاه در هنگام کم‌آبی و تنش خشکی به‌دست آمده که بیانگر آن است که تنش حتی برای دوره‌های کوتاه در زمان باز شدن گل‌ها، تعداد گل‌هایی که به دانه تبدیل می‌شوند را به طور معنی‌داری کاهش می‌دهد (Wright *et al.*, 1995).

همچنین بین سطوح مختلف کاربرد دی‌اکسید کربن تفاوتی از لحاظ آماری مشاهده نشد.

از طرفی دیگر مشاهده شد که بالاترین میانگین تعداد دانه در خورجین با میانگین ۲۴/۵۸۳ دانه مربوط به سطح تابش UVA بود. در این رابطه تحقیقات نشان می‌دهد که گیاهان در پاسخ به اشعه‌های UVB و UVC، ترکیبات جذب‌کننده تابش فرابنفش را به‌طور چشمگیری افزایش داده و در عوض میزان رنگدانه‌های فتوسنتزی، ارتفاع و سطح برگ را کاهش می‌دهند. از این‌رو به نظر می‌رسد که گیاهان در معرض اشعه‌های UVB و UVC با کاهش میزان فتوسنتز روبه‌رو شده و از طریق کاهش تعداد دانه در خورجین بین میزان مواد فتوسنتزی ساخته‌شده در منابع با دانه‌های موجود نوعی تعادل به وجود آورده باشند. همچنین تابش اشعه‌های پرانرژی طیف فرابنفش با تاثیر بر قابلیت باروری دانه‌های گرده، منجر به کاهش تلقیح تخمک‌ها شده و کاهش تعداد دانه در خورجین را باعث می‌شود. این نتایج با نتایج حاصل از بررسی Krizek *et al.* (1998) مطابقت دارد. همچنین مقایسه میانگین‌های اثر متقابل سه‌گانه آبیاری در

دی‌اکسید کربن در اشعهٔ فرابنفش نشان داد که هم در شرایط آبیاری و هم در شرایط تنش بالاترین میانگین تعداد دانه در خورجین در شرایطی به‌دست آمد که از غلظت ۴۰۰ ppm دی‌اکسید کربن و سطح تابش UVA استفاده شده بود. هر چند که اختلاف این تیمار با تیماری که در آن از ۹۰۰ ppm دی‌اکسید کربن و سطح تابش UVA استفاده شده بود از لحاظ آماری معنی‌دار نبود، اما با سایر سطوح اشعهٔ UV تحت همین شرایط در سطح پنج درصد دانکن معنی‌دار شد. از آنجاکه در شرایط تنش خشکی که گیاه ناگزیر به نیمه‌بسته کردن یا بسته کردن کامل روزنه‌ها می‌شود و در این شرایط گیاه با کمبود CO_2 نیز مواجه می‌شود، افزایش میزان CO_2 بتواند با افزایش فعالیت کربوکسیلاز آنزیم روبیسکو و کاهش تنفس نوری سبب افزایش فتوسنتز خالص در گیاه شده و از طریق افزایش مواد فتوسنتزی از ریزش دانه‌های موجود جلوگیری کند.

جدول۲- اثرات ساده رقم، آبیاری، دی‌اکسید کربن، اشعهٔ فرابنفش و همچنین اثر متقابل سه‌گانه آبیاری در دی‌اکسید کربن دراشعهٔ فرابنفش.

Table 2- Main effects of cultivar, irrigation, carbon dioxide and ultra violet treatments as well as triple interaction between irrigation, carbon dioxide and ultra violet treatments.

تیمار Treatment	خورجین در بوته Pod per plant	دانه در خورجین Seed number per pod	وزن هزار دانه (گرم) 1000-seed weight (g)	عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) Seed yield (Kg ha^{-1})	عملکرد روغن (کیلوگرم در هکتار) Oil yield (Kg ha^{-1})	فلاونوئید (میلی‌مول بر سانتی‌متر) Flavonoid (mM.cm^{-1})	آنتوسیانین (میلی‌مول بر سانتی‌متر) Anthocyanin (mM cm^{-1})	میزان فلورسانس Fluorescence
رقم اوکاپی Okapi	258.61a	19.08a	2.49b	2482.14b	1082.23b	0.826a	0.648a	0.411a
رقم طلایه Talaye	251.66b	16.94b	2.80a	2785.22a	1249.31a	0.806a	0.640a	0.413a
آبیاری نرمال Normal irrigation	277.75.a	21.11a	3.22a	2958.61a	1186.95a	0.747b	0.530b	0.454a
تنش آبی Water stress	232.52b	14.91b	2.06b	2308.75b	1144.59a	0.885	0.758a	0.369b
دی‌اکسیدکربن d400	257.75a	18.08a	2.41b	2474.14b	1057.73b	0.806a	0.623a	0.398b
دی‌اکسیدکربن d900	252.52b	17.94a	2.88a	2793.22a	1273.81a	0.826a	0.655a	0.426a
فرابنفش UV A	288.50a	24.58a	3.25a	2950.58a	1468.77a	0.579c	0.247c	0.499a
فرابنفش UV B	252.41b	17.75b	2.51b	2612.04b	1190.19b	0.892b	0.725b	0.430b
فرابنفش UV C	224.50c	11.70c	2.17c	2338.42c	838.35c	0.976a	0.961a	0.307c
i_1* d400* UV A	317.50a	27.16a	3.41b	3096.80b	1404.32bc	0.416f	0.105f	0.550a
i_1* d400* UV B	267.66c	22.00b	3.21b	2793.20cd	1058.54g	0.891cd	0.728d	0.441c
i_1* d400* UV C	244.66de	15.00c	2.71cd	2631.70de	822.89i	0.850d	0.628d	0.333e
i_1* d900* UV A	316.16a	27.66a	3.96a	3568.30a	1680.05a	0.486f	0.123f	0.573a
i_1* d900* UV B	284.50b	21.00b	3.23b	2905.30bc	1214.60de	0.966cd	0.660d	0.491b
i_1* d900* UV C	236.00e	13.83c	2.81c	2756.30cd	941.27h	0.970abc	0.940bc	0.338e
i_2* d400* UV A	265.16c	21.16b	2.35de	2479.00ef	1299.96cd	0.731e	0.405e	0.435c
i_2* d400* UV B	235.00rf	14.33c	1.43g	2233.50g	1140.80ef	0.923bcd	0.805cd	0.368d
i_2* d400* UV C	216.50g	8.83d	1.33g	1610.70h	619.85j	1.02ab	10.07ab	0.260g
i_2* d900* UV A	255.16cd	22.33b	3.30b	2658.20de	1490.76b	0.683e	0.358e	0.440c
i_2* d900* UV B	222.50fg	13.66c	2.18ef	2516.20ef	1346.80c	0.890cd	0.708d	0.418c
i_2* d900* UV C	200.83h	9.16d	1.81f	2355.00g	969.38gh	1.06a	1.20a	0.296f

میانگین‌های داده‌شده در هر ستون که دارای حروف مشترک هستند، تفاانظر آماری در سطح پنج درصد دانکن معنی‌دار نیست.

Values in each column followed by similar letters are not significantly different at 5% probability level, using Duncan's Multiple Range Test.

وزن هزار دانه

با توجه به جدول مقایسهٔ میانگین‌ها (جدول۲) مشاهده شد که بالاترین وزن هزار دانه مربوط به رقم طلایه بود. همچنین اثر ساده آبیاری نیز نشان داد که بالاترین وزن هزار دانه با میانگین ۳/۲۲۸ گرم مربوط به سطح آبیاری نرمال بود. وزن هزار دانه بالاتر مستلزم تجمع مواد فتوسنتزی در دانه‌ها بوده که تحت تأثیر تنش خشکی می‌تواند کاهش یابد. نتایج تحقیقات تعدادی از محققان نیز بر این امر تأکید دارد. کاهش در میزان عملکرد دانه در نتیجه کاهش در اجزای عملکرد به خصوص وزن دانه ها قبلاً توسط سایر محققان نیز گزارش شده است (Unger, 1982).

بالاترین وزن هزار دانه با میانگین ۲/۸۸۶ گرم مربوط به سطح کاربرد ۹۰۰ ppm دی‌اکسید کربن بود. به‌نظر می‌رسد افزایش میزان غلظت CO_2 در کلزا که از گیاهان سه‌کربنه است با کاهش میزان تنفس نوری سبب افزایش فتوسنتز خالص و افزایش انتقال مواد فتوسنتزی به سمت مخازن و افزایش وزن دانه‌های تشکیل شده باشد.

از طرفی دیگر مشاهده شد که بالاترین وزن هزار دانه با میانگین ۳/۲۵۸ گرم مربوط به سطح تابش UVA بود. کاهش میزان فتوسنتز به دلیل کاهش میزان سطح برگ و همچنین میزان کلروفیل در گیاهانی که در معرض تابش اشعه‌های UVBو UVC بوده‌اند، سبب کاهش ساخت مواد فتوسنتزی و انتقال آنها به سمت دانه‌های تشکیل‌شده و در نهایت سبب کاهش وزن دانه‌ها می‌شود. علاوه بر این اشعه‌های پرانرژی طیف فرابنفش سبب بروز آسیب‌های جدی به برگ‌های گیاه شده در نتیجه با کاهش سطح فتوسنتزکننده از میزان انتقال فرآورده‌های فتوسنتزی به مخازن کاسته می‌شود. تحقیقات سایر محققان نیز نشان داده است که اشعه‌های UVB سبب کاهش وزن دانه‌ها از طریق کاهش رشد و طول مدت پر شدن دانه‌ها از مواد فتوسنتزی می‌شود (Liu *et al*., 2013).

همچنین مقایسه میانگین‌های اثر متقابل سه‌گانه آبیاری در دی‌اکسید کربن در اشعهٔ فرابنفش نشان داد که هم در شرایط آبیاری هم شرایط تنش بالاترین میانگین وزن هزار دانه در شرایطی به‌دست آمد که از غلظت ۹۰۰ ppm دی‌اکسید کربن و سطح تابش UVA استفاده شده بود. این نتایج نشان می‌دهد که در شرایط تنش که گیاه با محدودیت CO_2 و فتوسنتز به دلیل نیمه‌بسته کردن یا بسته کردن روزنه‌ها مواجه است، افزایش میزان CO_2 می‌تواند سبب افزایش میزان فتوسنتز و افزایش انتقال مواد فتوسنتزی به سمت دانه‌های تشکیل‌شده شود.

عملکرد دانه

با توجه به جدول مقایسهٔ میانگین‌ها (جدول۲) مشاهده شد که بالاترین عملکرد دانه مربوط به رقم طلایه بود. همچنین اثر ساده آبیاری نیز نشان داد که بالاترین عملکرد دانه با میانگین ۲۹۵۸/۶۱ کیلوگرم در هکتار مربوط به سطح آبیاری نرمال بود. علت بیشتر بودن عملکرد دانه در شرایط بدون تنش در دسترس بودن آب کافی برای گیاه بوده که سبب افزایش اجزاء عملکرد و در نهایت افزایش عملکرد دانه شده است. این نتایج با نتایج حاصل از آزمایشی که توسط شارما صورت گرفت و بیانگر کاهش ۳۰ درصدی عملکرد و ۲۰ درصدی وزن خشک در اثر تنش خشکی در اوایل دوره گل‌دهی بود، مطابقت دارد (Sharma, 1992).

همچنین بالاترین عملکرد دانه با میانگین ۲۷۹۳/۲۲ کیلوگرم در هکتار مربوط به سطح کاربرد ۹۰۰ ppm دی‌اکسید کربن بود. در واقع با افزایش میزان CO_2 با افزایش تعداد خورجین در بوته و همچنین افزایش وزن هزار دانه، عملکرد نیز افزایش می‌یابد. افزایش عملکرد دانه از طریق افزایش میزان CO_2 توسط سایر محققان نیز اثبات شده است. آنها بیان کردند که از عامل‌های مربوط به افزایش زیست‌توده در نتیجه افزایش سطح CO_2 در فتوسنتز بیشتر، به بررسی کارایی مصرف آب بالاتر، کاهش در تنفس و تأخیر در پیری برگ پرداختند. بر اساس گزارش آنها پاسخ‌های عملکرد به افزایش CO_2 به گونه گیاهی بستگی دارد. گونه‌هایی که ظرفیت انتقال بهتر و مقصد فیزیولوژیک بزرگتری دارند می‌توانند بهترین افزایش‌دهنده مصرف کربن اضافی تثبیت‌شده تحت شرایط CO_2 زیاد باشند (Finnan *et al*., 2002).

از طرفی دیگر مشاهده شد که بالاترین عملکرد دانه با میانگین ۳۰۹۶/۸ کیلوگرم در هکتار مربوط به سطح تابش UVA بود. کاهش میزان عملکرد در پاسخ به سطح تابش‌های UVB و UVC می‌تواند ناشی از کاهش سطح برگ و کاهش میزان فتوسنز باشد. نتایج حاصل از بررسی‌های سایر محققان نیز این نتایج را اثبات می‌کند. خسارت به DNA، پراکسیداسیون چربی‌ها، اکسیداسیون نوری رنگدانه‌ها و بازدارندگی فتوسنتزی پاسخ گیاهان به سطح تابش‌های مضر اشعه فرابنفش برشمرده می‌شود. از سویی دیگر تحقیقات نشان داد که تابش فرابنفش به‌طور غیرمستقیم با تغییر فعالیت روزنه‌ای، غلظت رنگدانه‌های

فتوسنتزی و آناتومی برگ می‌تواند فتوسنتز را تحت تأثیر قرار دهد (Correia *et al.*, 2005). نتایج بررسی‌های سایر محققان نشان داده است که سطح تابش UVB سبب کاهش عملکرد در تک‌بوته‌های سویا شده است (Liu *et al.*, 2009).

مقایسه میانگین‌های اثر متقابل سه‌گانه آبیاری در دی‌اکسید کربن در اشعهٔ فرابنفش نیز نشان داد که هم در شرایط آبیاری و هم تنش بالاترین میانگین عملکرد دانه در شرایطی به‌دست آمد که از غلظت ۹۰۰ ppm دی‌اکسید کربن و سطح تابش UVA استفاده شده بود. به بیانی دیگر در شرایط تنش خشکی افزایش در غلظت دی‌اکسید کربن می‌تواند تا حدودی محدودیت ناشی از نیمه‌بسته شدن روزنه‌های گیاه را که در پاسخ به کمبود آب اتفاق افتاده است، جبران کرده و بررسی‌های صورت‌گرفته در این آزمایش حاکی از افزایش ۷ درصدی عملکرد دانه تحت این شرایط است. در این رابطه تحقیقات نشان داده است که افزایش عملکرد گیاه تحت تیمار افزایش دی‌اکسید کربن به دلیل تثبیت کربن فتوسنتزی بیشتر و باقی ماندن رطوبت قابل فراهم بیشتر در خاک به دلیل کاهش تعرق افزایش یابد (Reyes-Fox *et al.*, 2014).

عملکرد روغن

با توجه به جدول مقایسهٔ میانگین‌ها (جدول۲) مشاهده شد که بالاترین عملکرد روغن مربوط به رقم طلایه بود. اثر ساده آبیاری نیز نشان داد که بین سطوح مختلف آبیاری از نظر آماری تفاوتی وجود نداشته و هر دو سطح در یک گروه قرار گرفته‌اند. به‌نظر می‌رسد افزایش درصد روغن در اثر تنش خشکی نسبت به شرایط آبیاری تا حدودی جبران کاهش خسارت عملکرد دانه تحت شرایط خشکی را کرده و از این رو سبب افزایش عملکرد روغن در تیمار تنش خشکی شده است. همچنین بالاترین عملکرد روغن با میانگین ۱۲۷۳/۸۱ کیلوگرم در هکتار مربوط به سطح کاربرد ۹۰۰ ppm دی‌اکسید کربن بود. افزایش ساخت مواد فتوسنتزی با افزایش میزان CO_2 سبب افزایش انتقال مواد فتوسنتزی به سمت دانه‌ها و افزایش درصد روغن و همچنین افزایش عملکرد دانه و در نهایت افزایش عملکرد روغن می‌شود. همچنین مشاهده شد که بالاترین عملکرد روغن با میانگین ۱۴۶۸/۷۷ کیلوگرم در هکتار مربوط به سطح تابش UVA بود. کاهش درصد روغن در اثر افزایش اکسیداسیون چربی‌ها در گیاهان در معرض سطوح تابش‌های مضر اشعه فرابنفش از یک سو و کاهش عملکرد دانه ناشی از کاهش میزان فتوسنتز در اثر کاهش سطح برگ و همچنین میزان کلروفیل از سوی دیگر سبب کاهش میزان عملکرد روغن در سطوح UVB و UVC اشعهٔ فرابنفش شد.

همچنین مقایسه میانگین‌های اثر متقابل سه‌گانه آبیاری در دی‌اکسید کربن در اشعهٔ فرابنفش نشان داد که هم در شرایط آبیاری و هم تنش بالاترین میانگین عملکرد روغن در شرایطی به‌دست آمد که از غلظت ۹۰۰ ppm دی‌اکسید کربن و سطح تابش UVA استفاده شده بود. در این رابطه افزایش میزان فتوسنتز در شرایط محدودیت ناشی از نیمه‌بسته شدن روزنه‌ها سبب هم افزایش عملکرد دانه و هم افزایش درصد روغن شده و از این رو سبب افزایش عملکرد روغن را فراهم آورده است به‌طوری‌که این نتایج نشان می‌دهد که با افزایش میزان دی‌اکسید کربن به ۹۰۰ ppm تحت شرایط تنش خشکی میزان عملکرد روغن نسبت به شرایطی که ۴۰۰ ppm دی‌اکسید کربن در اختیار گیاه قرار داشت، در حدود ۱۳ درصد افزایش می یابد.

فلاونوئید

با توجه به جدول مقایسه میانگین‌ها (جدول۲) مشاهده شد که بین دو رقم از نظر میزان فلاونوئید برگ از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. همچنین اثر ساده آبیاری نیز نشان داد که بالاترین میزان فلاونوئید برگ با میانگین ۰/۸۸۵ میلی‌مولار بر سانتی‌متر مربوط به سطح تنش بود. هر نوع شرایط تنش خشکی سبب افزایش میزان فلاونوئیدها در گیاه می‌شود. همچنین بین سطوح مختلف غلظت دی‌اکسید کربن از نظر میزان فلاونوئید برگ تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. از طرفی دیگر مشاهده شد که بالاترین میزان فلاونوئید برگ با میانگین ۰/۹۷۶ میلی‌مولار بر سانتی‌متر مربوط به سطح تابش UVC بود. بررسی‌ها نشان داد که تابش فرابنفش سنتز فلاونوئیدهای مختلف را به‌عنوان محافظ در برابر اثرات مضر این اشعه، تحریک می‌کند (Sullivan *et al.*, 1990). مقایسه میانگین‌های اثر متقابل سه‌گانه آبیاری در دی‌اکسید کربن در اشعهٔ فرابنفش نیز نشان داد که هم در شرایط آبیاری و هم تنش بالاترین میانگین میزان فلاونوئید برگ در شرایطی به‌دست آمد که از سطوح پرانرژی‌تر اشعه فرابنفش استفاده شد و بالاترین میزان آن در غلظت ۹۰۰ ppm دی‌اکسید کربن و سطح تابش UVC به‌دست آمد. پژوهش سایر محققان درباره سویا نشان داد که تابش‌های فرابنفش کاهش فتوسنتز و رشد را تنها در گیاهان آبیاری کامل‌شده

القاء کرده است و در زمان تنش آبی هیچ اثر معنی‌داری روی این پارامترها دیده نشده است. زیرا در تنش خشکی مقدار بیشتری از این فلاونوئیدهای برگ تولید شده که گیاه را در برابر تابش فرابنفش محافظت می‌کند. این طور پیشنهاد می‌شود که گونه‌های مقاوم به خشکی حفاظت بیشتری در مقابل اثرات زیان‌آور تابش فرابنفش از خود نشان می‌دهند (Sullivan *et al.*, 1990).

گزارش شده است که در گونه‌های گیاهی در پاسخ به تابش فرابنفش پارامترهایی مانند سطح برگ، تولید زیست‌توده، رنگدانه‌های فتوسنتزی و ارتفاع گیاه کاهش یافته و ضخامت برگ و میزان ترکیبات جذب‌کننده تابش فرابنفش به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد (Krizek *et al.*,1998).

همچنین تحقیقات نشان داد که گیاهان تیمارشده با UVBدارای بالاترین میزان آنتوسیانین، فلاونوئید و کاروتنوئید هستند (Bacelar *et al.*, 2015).

آنتوسیانین

با توجه به جدول مقایسه میانگین‌ها (جدول۲) بین دو رقم از نظر میزان آنتوسیانین برگ از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. همچنین اثر ساده آبیاری نیز نشان داد که بالاترین میزان آنتوسیانین برگ با میانگین ۰/۷۵۸ میلی‌مولار بر سانتی‌متر مربوط به سطح تنش بود. شرایط تنش خشکی سبب افزایش میزان آنتوسیانین برگ در گیاه می‌شود. همچنین بین سطوح مختلف غلظت دی‌اکسید کربن از نظر میزان آنتوسیانین برگ تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. از طرفی دیگر مشاهده شد که بالاترین میزان آنتوسیانین برگ با میانگین ۰/۹۶۱ میلی‌مولار بر سانتی‌متر مربوط به سطح تابش UVC بود. بررسی‌های سایر پژوهشگران نشان داد که افزایش میزان آنتوسیانین برگ، گیاه را در برابر اثرات تخریبی نور فرابنفش و تابش شدید نور محافظت می‌کند (Krizek *et al.*, 1998).

مقایسه میانگین‌های اثر متقابل سه‌گانه آبیاری در دی‌اکسید کربن در اشعهٔ فرابنفش نیز نشان داد که هم در شرایط آبیاری و هم تنش بالاترین میانگین میزان آنتوسیانین برگ در شرایطی به‌دست آمد که از سطوح پرانرژی‌تر اشعهٔ فرابنفش استفاده شد و بالاترین میزان آن در غلظت ۹۰۰ ppm دی‌اکسید کربن و سطح تابش UVC به‌دست آمد. شرایط تنش خشکی باعث افزایش بیشتر آنتوسیانین‌های برگ نسبت به شرایط آبیاری در سطوح پرانرژی‌تر اشعهٔ فرابنفش شد.

افزایش در میزان آنتوسیانین ها به دلیل افزایش اشعه فرابنفش، به نقش محافظتی این رنگدانه‌ها در سیستم‌های فتوسنتزی در کاهش انرژی بر انگیخته در چرخه زانتوفیل‌ها است. تجمع رنگدانه‌های جذب‌کننده اشعه فرابنفش از قبیل کارتنوئیدها، فلاونوئیدها و آنتوسیانین‌ها یکی از راه‌هایی است که گیاهان برای تعدیل اثرات مضر تنش UV به‌کار می‌گیرند. افزایش در محتوای فلاونوئیدها در گیاهان تحت تنش اشعه فرابنفش قبلاً توسط سایر پژوهشگران در تأئید نتایج این پژوهش در اسفناج گزارش شده است (Shweta and Agrawal, 2006).

میزان فلورسانس

با توجه به جدول مقایسه میانگین‌ها (جدول۲) مشاهده شد که بین ارقام از نظر میزان فلورسانس تفاوتی وجود ندارد. همچنین اثر ساده آبیاری نیز نشان داد که بالاترین عملکرد کوانتومی (۰/۴۵۴) مربوط به سطح آبیاری معمول بود. در واقع تنش خشکی موجب کاهش عملکرد کوانتومی تبدیل انرژی فتوشیمیایی شد.

همچنین بالاترین عملکرد کوانتومی با میانگین ۰/۴۲۶ مربوط به سطح کاربرد ۹۰۰ ppm دی‌اکسید کربن بود. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش غلظت دی‌اکسید کربن سبب بهبود سیستم نوری در گیاه می‌شود. به‌نظر می‌رسد که این غلظت دی‌اکسید کربن اضافی سبب افزایش دسترسی گیاه به دی‌اکسید کربن و افزایش فعالیت کربوکسیلاز آنزیم روبیسکو و افزایش کارایی سیستم فتوسنتزی گیاه می‌شود.

از طرفی دیگر مشاهده شد که بالاترین عملکرد کوانتومی با میانگین ۰/۴۹۹ مربوط به سطح تابش UVA بود. مقایسه میانگین‌های اثر متقابل سه‌گانه آبیاری در دی‌اکسید کربن در اشعهٔ فرابنفش نیز نشان داد که هم در شرایط آبیاری و هم تنش در شرایطی که از غلظت ۴۰۰ ppm دی‌اکسید کربن و هم در شرایطی که از غلظت ۹۰۰ ppm دی‌اکسید کربن استفاده شده بود بالاترین میزان عملکرد کوانتومی مربوط به سطح تابش UVA بود. کاهش در میزان فلورسانس کلروفیل تحت اشعه فرابنفش در هر دو غلظت دی‌اکسید کربن نشان‌دهنده آسیب به پروتئین‌های D_1 و D_2 در فتوسیستم II است و با تخریب کلروفیل، ممکن است منجر به کاهش بازده کوانتومی و یا ظرفیت فتوسنتزی کمتر در گیاه شود (Olsson *et al.*, 2000).

جدول ۳- مقادیر ویژه و بردارهای ویژه و ضرایب هر کدام از صفات در اولین و دومین مؤلفه.

Table 3- Specific values and vectors as well as coefficient of each trait in the first and second component.

صفات Traits	مولفه اول Prin1	مولفه دوم Prin2
تعداد خورجین در بوته Pod number per plant	0.044	-0.001
تعداد دانه در خورجین Seed number per pod	0.007	0.004
وزن هزار دانه 1000-seed weight	0.001	-0.0008
عملکرد دانه Seed yield	0.88	-0.46
عملکرد روغن Oil yield	0.46	0.89
محتوی فلاونویید Flavonoid	-0.0002	-0.0003
محتوی آنتوسیانین Anthocyanin	-0.0004	-0.0005
فلورسانس کلروفیل Chlorophyll fluorescence	0.0001	0.0001
مقادیر ویژه Eigen value	335368.7	34757.7
نسبت (درصد) Proportion(%)	90	9.4

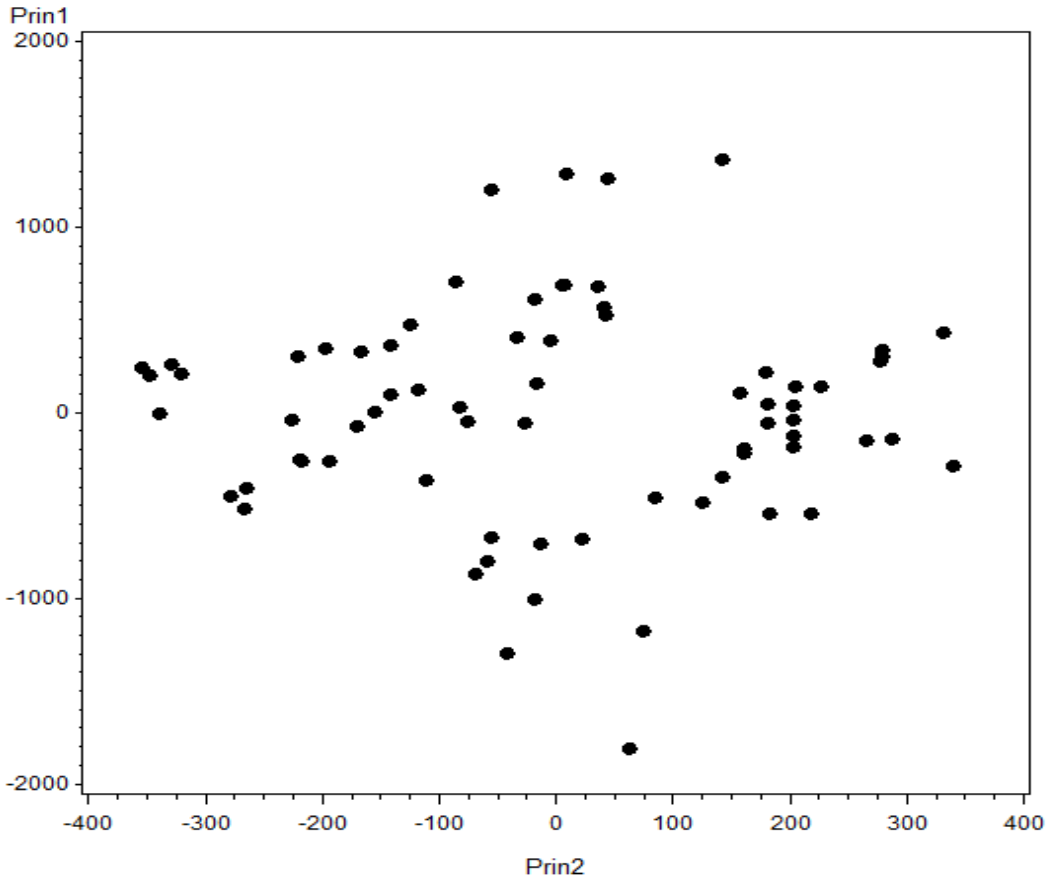
جدول ۴- ضریب همبستگی صفات اندازه‌گیری‌شده و مؤلفه‌های اصلی.

Table 4- Correlation coefficient of studied traits and main components.

صفات Traits	خورجین در بوته Pod per plant	دانه در خورجین Seed per pod	وزن هزار دانه 1000-seed weight	عملکرد دانه Seed yield	عملکرد روغن Oil yield	فلاونویید Flavonoid	آنتوسیانین Anthocyanin	فلورسانس کلروفیل Chlorophyll fluorescence	مولفه اول (Prin1)	مولفه دوم (Prin2)
تعداد خورجین در بوته **Pod per plant**	1									
تعداد دانه در خورجین **Seed per pod**	0.84**	1								
وزن هزار دانه **1000-seed weight**	0.71**	0.71**	1							
عملکرد دانه **Seed yield**	0.66**	0.63**	0.82**	1						
عملکرد روغن **Oil yield**	0.57**	0.62**	0.59**	0.75**	1					
فلاونویید **Flavonoid**	-0.77**	-0.75**	-0.60**	-0.57**	-0.64**	1				
آنتوسیانین **Anthocyanin**	-0.75**	-0.76**	-0.59**	-0.55**	-0.66**	0.96**	1			
فلورسانس کلروفیل **Chlorophyll fluorescence**	0.84**	0.86**	0.72**	0.75**	0.80**	-0.78**	-0.78**	1		
مولفه اول **(Prin1)**	0.67**	0.66**	0.80**	0.99**	0.85**	-0.62**	-0.61**	0.80**	1	
مولفه دوم (Prin2)	-0.005	0.12	-0.17	-0.17	0.52**	-0.23	-0.27*	0.23*	0	1

همبستگی صفات اندازه‌گیری شده و مؤلفه‌های اصلی

در تجزیه به مؤلفه‌های اصلی هشت صفت اندازه‌گیری‌شده در آزمایش به کار برده شد که دو مؤلفه اول ۹۹/۴ درصد از واریانس متغیرها را توجیه می‌کند (جدول ۳ و شکل ۱). مؤلفه اول که همبستگی مثبت و معنی‌داری با اکثر متغیرها (به جز متغیرهای فلاونویید و آنتوسیانین که رابطه منفی و معنی‌دار است) به ویژه عملکرد دانه دارد (جدول ۴) می‌تواند به‌عنوان شاخص عملکرد دانه محسوب شود و این مؤلفه ۹۰ درصد واریانس متغیرها را توجیه می‌کند (جدول ۳). مؤلفه دوم که با عملکرد روغن و فلورسانس کلروفیل همبستگی مثبت و معنی‌دار و با آنتوسیانین همبستگی منفی و معنی‌داری دارد (جدول ۴) می‌تواند به‌عنوان شاخص عملکرد روغن درنظر گرفته شده که ۹/۴ درصد از کل تغییرات را توجیه می‌کند (جدول ۳). حداکثر همبستگی این مؤلفه با عملکرد روغن است. این دو مؤلفه هیچ همبستگی با یکدیگر ندارند (شکل ۱).



شکل ۱- نمودار مؤلفه‌های اول و دوم.
Fig. 1- The first and second components.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که تنش خشکی سبب کاهش تعداد خورجین در بوته، تعداد دانه در خورجین، وزن هزار دانه، عملکرد دانه و میزان فلورسانس شد در حالی‌که سبب افزایش میزان رنگدانه‌های فلاونوئید و آنتوسیانین در گیاه شد. همچنین افزایش میزان سطح دی‌اکسید کربن تا سطح ۹۰۰ ppm سبب افزایش وزن دانه‌ها، عملکرد دانه، عملکرد روغن و میزان فلورسانس گیاه شد. درحالی‌که اشعه فرابنفش با سطوح پرانرژی‌تر سبب کاهش کلیه صفات آزمایشی به جز میزان فلاونوئید و آنتوسیانین‌ها شد. افزایش سطح دی‌اکسید کربن کربن تا سطح ۹۰۰ ppm می‌تواند اثرات مخرب سطوح پرانرژی اشعه فرابنفش را بر وزن هزار دانه، عملکرد دانه، عملکرد روغن و میزان فلورسانس جبران کند و سبب افزایش این صفات شود. نتایج این بررسی نشان داد که افزایش سطح دی‌اکسید کربن کربن تا سطح ۹۰۰ ppm می‌تواند برخی از اثرات مخرب تشعشع فرابنفش را بر گیاه کلزا تعدیل کند.

منابع

Aljazairi, S., Arias, C. and Nogués, S., 2015. Carbon and nitrogen allocation and partitioning in traditional and modern wheat genotypes under pre-industrial and future CO2 conditions. Plant Biology.17, 647-659.

Anonymous. 2011. Scientific assessment of ozone depletion. Global Ozone Research and Monitoring Project Report. Geneva, Switzerland. W.M.O.

Bacelar, E., Moutinho-Pereira, J., Ferreira, H. and Correia, C., 2015. Enhanced ultraviolet-B radiation affect growth, yield and physiological processes on triticale plants. Procedia Environmental Sciences. 29, 219- 220.

Buchholz, G., Ehmann, B. and Wellman, E., 1995. Ultraviolet light inhibition of phytochorome induced flavonoid biosynthesis and DNA photolyase formation in mustard cotyledons (Synapis alba L.). Plant Physiology. 108, 227-234.

Correia, C.M., Pereira, J.M., Bjorn, L.O. and Torres-Pereira, J.M.G., 2005. Ultraviolet radiation and nitrogen affect the photosynthesis of maize. European Journal of Agronomy. 22, 337-347.

Del Amor, F.M., Pinero, M.C., Otalora-Alcon, G., Perez-Jimenez, M. and Marin-Minano, M., 2015. Effect of different nitrogen forms and CO2 enrichment on the nutrient uptake and water relations of pepper plants (Capsicum annuun L.). Procedia Environmental Sciences. 29, 203-204.

Dwivedi, R., Singh, V.P., Kumar, J. and Prasad, S.M., 2015. Differential physiological and biochemical responses of two Vigna species under enhanced UV-B radiation. Journal of Radiation Research and Applied Sciences. 8, 73-181.

Finnan, J.M., Donnelly, A., Burke, J.I. and Jones, M.B., 2002. The effects of elevated concentrations of carbon dioxide and ozone on potato yield. Agriculture Ecosystems and Environment. 88, 11-22.

IPCC., 2014. Working Group III Technical Support Unit.Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Summary for Policymakers.

Krizek, D.T., Brita, S.J. and Miewcki, R.M., 1998. Inhibitory effects of ambient level of solar UV-A and UV-B on growth of cv. New Red Fire lettuce. Plant Physiology. 103, 1-7.

Liu, B., Liu, X.B., Li, Y.S. and Herbert, S.J., 2013. Effects of enhanced UV-B radiation on seed growth characteristics and yield components in soybean. Field Crops Research. 154, 158-163.

Liu, B., Wang, C., Jin, J., Liu, J.D., Zhang, Q.Y. and Liu, X.B., 2009. Responses of soybean and other plants to enhanced UV-B radiation. Soybean Science. 28, 1097-1102.

Lobell, D.B., Roberts, M.J., Schlenker, W., Braun, N., Little, B.B., Rejesus, R.M. and Hammer, G.L., 2014 Greater sensitivity to drought accompanies maize yield increase in the US Midwest. Science. 344, 516-519.

Marin, F.R., Jones, J.W., Singels, A., Royce, F., Assad, E.D., Pellegrino, G.Q. and Justino, F., 2013. Climate change impacts on sugarcane attainable yield in southern Brazil. Climate Change. 117, 227-239.

Olsson, L.C., Fraysee, L. and Bornman, J.F., 2000. Influence of high light and UVB radiation on photosynthesis and D1 turnover in atrazine-tolerant and sensitive cultivars of Brassica napus L. Journal of Experimental Botany. 51, 265-274.

Reyes-Fox, M., Steltzer, H., Trlica, M., McMaster, G.S., Andales, A.A., Le Cain, D.R. and Morgan, J.A., 2014. Elevated CO2 further lengthens growing season under warming conditions. Nature. 510, 259-262.

Sharma, D.K., 1992. Physiological analysis of yield variations mustard varieties under water stress and non-stress conditions. Annals of Agricultural Research. 13, 174-176.

Shweta, M. and Agrawal, S.B., 2006. Interactive effects between supplemental ultraviolet-B radiation and heavy metals on the growth and biochemical characteristics of Spinacia oleracea L. Brazilian Journal of Plant Physiology. 18, 307-314.

Stokes, C.J, Inman-Bamber, N.G., Everingham, Y.L. and Sexton, J., 2016. Measuring and modelling CO2 effects on sugarcane. Environmental Modelling and Software. 78, 68-78.

Sullivan, J.H. and Teramura, A.H., 1990. Field study on the interaction between solar ultraviolet-B radiation and drought on photosynthesis and growth in soybean. Plant Physiology. 92, 141-146.

Tanyolac, D., Ekmekci, Y. and Unalan, S., 2007. Changes in photochemical and antioxidant enzyme activities in maize (Zea mays L.) leaves exposed to excess copper. Chemosphere .67, 89-98.

Unger, P.W., 1982. Time and frequency of irrigation effects on sunflower production and water use. Soil Science Social. American Journal. 46, 1072-1076.

Vandegeer, R., Miller, R.E., Bain, M., Gleadow, R.M. and Cavagnaro, T.R., 2013. Drought adversely affects tuber development and nutritional quality of the staple crop cassava (Manihot esculenta Crantz). Functional. Plant Biology. 40, 195-200.

Walton, G., Medham, N., Robertson, M. and Potter, T., 2002. Phenology, Physiology and Agronomy. Australian Journal of Agricultural Research. 59, 1425-39.

Wright, P.R., Morgan, J.M.R., Jessop, S. and Gass, A., 1995. Comparative adaption canola (Brassica napus L.) and Indian mustard (Brassica juncea) to soil water deficits: Yield and yield components. Field Crops Research. 42, 1-13.

Effect of elevated CO_2, drought stress and ultra violet on quantity and quality characteristics in two autumn cultivars of canola (*Brassica napus* L.)

Hamid Reza Tohidi Moghadam,[1*] Behzad Sani,[2] Hossein-Ali Sheybani[1] and Seyed Ali Mohamad Modarres Sanavy[3]

[1] Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Islamic Azad University, Varamin- Pishva Branch, Varamin, Iran
[2] Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Islamic Azad University, shahr e Qods, Tehran, Iran
[3] Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Received: February 12, 2016 Accepted: October 11, 2016

Citation: Tohidi Moghadam, H.R., Sani, B., Sheybani, H.A. and Modarres Sanavy, S.M.A., 2016. Effect of elevated CO_2, drought stress and ultra violet on quantity and quality characteristics in two autumn cultivars of canola (*Brassica napus* L.). Environmental Sciences. 14(3), 57-72.

Introduction: Drought, UV radiation and increased carbon dioxide concentrations are the most important abiotic stress factors threatening human food security. In the recent decades, several studies have been carried out for understanding the individual effect of each of these factors on crop growth and production. However, there is no comprehensive study encompassing the interaction between these factors on qualitative and quantitative traits of canola. Accordingly, an experiment was conducted to evaluate the role of irrigation levels, CO_2 concentration levels and ultraviolet levels on two autumn cultivars of canola.

Material and methods: the experiment was carried out as a Randomized Complete Block Design with a Factorial arrangement with three replications in 2013. The factors in this study included the two cultivars 'Okapi' and 'Talaye' and the irrigation strategy had two levels: normal irrigation as the control and drought stress from the flowering stage to physiological maturity (irrigation on base 60 percent of field capacity). CO_2 concentration was allotted at two levels, namely ambient (400 µmol mol^{-1}) and enriched (900 µmol mol^{-1}) carbon dioxide (CO_2) concentrations and ultraviolet radiation at three levels as follows: ultraviolet-A radiation (18µWcm^{-2} intensity), ultraviolet-B radiation (25µWcm^{-2} intensity) and ultraviolet-C radiation (40µWcm^{-2} intensity) respectively. In this study, the number of pods per plant, number of grains per pod, one thousand grain weight, grain yield and oil yield, flavonoid pigment, anthocyanin pigment and fluorescence were all determined.

Results and discussion: The results showed that irrigation strategy significantly affected all the studied traits except for oil yield. Water stress significantly decreased the number of siliques per plant, number of seeds per silique, 1000-seed weight, the final yield and fluorescence but increased flavonoid and anthocyanin pigments. An increase in the CO_2 level was not significant on silique number per plant, flavonoid and anthocyanin content but it significantly increased seed weight, final yield, oil yield and fluorescence in plants. The effect of UV radiation was significant on all studied traits, and UV radiation decreased all of the traits in this experiment except for flavonoid and anthocyanin pigments. Triple interaction between experimental factors was significant on seed yield and oil yield at 0.01 and 0.05 probability levels, respectively. Comparison of means indicated that either under full irrigation conditions or water stress conditions the maximum seed yield was related to 900 ppm CO_2 and UVA treatment.

Conclusion: Overall, elevated CO_2 could ameliorate the adverse effects of UV radiation in 1000-seed weight, the final yield, oil yield and fluorescence and improve these traits.

Keywords: Canola, Drought stress, Carbon dioxide, Ultraviolet, Seed yield.

[*] Corresponding Author. *E-mail Address*: tohidi@iauvaramin.ac.ir