The effect of drought stress on some qualitative and biochemical indices of rapeseed (*Brassica napus* L.) genotypes

Saber Seifamiri[1*] and Mohammad Seifamiri[2]

1 -Crop and Horticultural Science Research Department, Ardabil Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Ardabil, Iran
2- Department of Agronomy and Plant Breeding, College of Agriculture, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
* Corresponding author, Email: saber.seifamiri@gmail.com

نسخه پیش از انتشار اصلاح نشده

Abstract

Background and Objective: Drought stress is the most important limiting factor for rapeseed yield in dryland areas, and tolerant cultivars based on physical indices are a solution to reduce this assessment. This study aimed to evaluate qualitative and biochemical indices as biomarkers of tolerance and identify drought-tolerant rapeseed genotypes.

Methods: : The experiment was conducted in a split plot in a randomized complete block design with three replications and in two crop years. The main factor included three irrigation regimes (full irrigation, irrigation interruption at flowering stage and irrigation interruption at pod stage) and the subfactor included 11 canola genotypes. The measured traits included oil yield, fatty acid profile and seed glucosinolate content.

Results: Drought stress, especially at the flowering stage, significantly reduced oil yield. Among the 11 genotypes studied, Jerome (under post-flowering stress) and Saffar (under post-flowering stress) cultivars were identified as drought-tolerant genotypes due to their greater stability in maintaining oil yield and limited changes in fatty acid profiles. In contrast, Zafar cultivar showed the most sensitive biochemical response with a 148.7% increase in erucic acid and a 32.6% decrease in palmitic acid. The Julius and RGS003 cultivars, despite being more sensitive to stress, also produced the highest oil yield under full irrigation conditions.

Conclusion: Drought tolerance in canola does not necessarily equate to high yield potential. The Jerome and Saffar genotypes, with their metabolic stability mechanism, are recommended for cultivation in areas prone to late-season stress, while the Julius and RGS003 cultivars are good choices for fully irrigated conditions. Therefore, selecting the right cultivar for water-deficit areas requires simultaneous consideration of “physiological tolerance” and “yield potential.”

Keywords: Water deficit, oilseed, fatty acids, cultivar, oil.

تأثیر تنش خشکی روی برخی شاخص‌های کیفی و بیوشیمیایی ژنوتیپ‌های کلزا (*Brassica napus* L.)

صابر سیف امیری[1*] و محمد سیف امیری[2]

۱- بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی اردبیل، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اردبیل، ایران

۲- گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: saber.seifamiri@gmail.com

نسخه پیش از انتشار (اصلاح نشده)

چکیده

پیشینه پژوهش و هدف: تنش خشکی مهم‌ترین عامل محدودکننده عملکرد کلزا در مناطق دیم است و انتخاب ارقام متحمل بر اساس شاخص‌های فیزیولوژیک، راهکاری مؤثر برای کاهش این خسارت محسوب می‌شود. این پژوهش با هدف ارزیابی شاخص‌های کیفی و بیوشیمیایی به‌عنوان بیومارکرهای تحمل و شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل کلزا به خشکی اجرا گردید.

روش‌ها: آزمایش به‌صورت اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار و در دو سال زراعی اجرا شد. فاکتور اصلی شامل سه رژیم آبیاری (آبیاری کامل، قطع آبیاری از مرحله گل‌دهی و قطع آبیاری از مرحله خورجین‌دهی) و فاکتور فرعی شامل ۱۱ ژنوتیپ کلزا بود. صفات اندازه‌گیری‌شده شامل عملکرد روغن، پروفیل اسیدهای چرب و میزان گلوکوزینولات دانه بود.

نتایج: تنش خشکی به‌ویژه در مرحله گل‌دهی، کاهش معنی‌دار عملکرد روغن را به‌دنبال داشت. از میان ۱۱ ژنوتیپ مورد بررسی، ارقام Jerome (در تنش پس از خورجین‌دهی) و Saffar (در تنش پس از گل‌دهی) به‌دلیل پایداری بیشتر در حفظ عملکرد روغن و تغییرات محدودتر در پروفیل اسیدهای چرب، به‌عنوان ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی شناسایی شدند. در مقابل، رقم Zafar با افزایش ۱۴۸.۷ درصدی اسید اروسیک و کاهش ۳۲.۶ درصدی اسید پالمتیک، حساس‌ترین واکنش بیوشیمیایی را نشان داد. ارقام Julius و RGS003 نیز با وجود حساسیت بیشتر به تنش، در شرایط آبیاری کامل بیشترین عملکرد روغن را تولید کردند.

نتیجه‌گیری کلی: تحمل به خشکی در کلزا لزوماً با پتانسیل عملکرد بالا همراه نیست. ژنوتیپ‌های Jerome و Saffar با مکانیسم حفظ پایداری متابولیکی، برای کشت در مناطق مستعد تنش انتهای فصل توصیه می‌شوند، در حالی که ارقام Julius و RGS003 گزینه‌های مطلوبی برای شرایط آبیاری کامل هستند. بنابراین، انتخاب رقم مناسب برای مناطق کم‌آب نیازمند در نظر گرفتن هم‌زمان «تحمل فیزیولوژیک» و «پتانسیل عملکرد» می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: کم آبی، دانه روغنی، اسیدهای چرب، رقم، روغن.

مقدمه

افزایش جمعیت جهان هم‌زمان با تغییرات اقلیمی و محدودیت شدید منابع، امنیت غذایی را با چالشی بی‌سابقه مواجه کرده است. از آنجا که افزایش سطح زیرکشت به دلیل محدودیت اراضی قابل استفاده عملاً امکان‌پذیر نیست، تمرکز اصلی بر افزایش عملکرد در واحد سطح و بهبود بهره‌وری محصولات استراتژیک قرار گرفته است. در این میان، تأمین روغن خوراکی به‌عنوان یکی از اساسی‌ترین کالاهای تغذیه‌ای از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، به‌طوری‌که سالانه هزینه سنگینی برای واردات آن در کشورهای مختلف پرداخت می‌شود (Popescu et al., 2019). ایران نیز با وابستگی حدود ۷۰ درصدی به واردات روغن خوراکی، سالانه بالغ بر یک میلیارد دلار هزینه در این بخش متحمل می‌شود (Anonymous, 2020). این وابستگی، ضرورت تمرکز بر تولید داخلی دانه‌های روغنی را بیش از پیش آشکار می‌سازد.

در بین بیش از ۳۵۰ گونه گیاهی تولیدکننده روغن (Varényiová et al., 2017)، کلزا (*Brassica napus* L.) به‌عنوان گیاهی یک‌ساله با تیپ‌های بهاره و پاییزه (Asaduzzaman et al., 2014)، پس از سویا و نخل روغنی، رتبه سوم تولید روغن در جهان را به خود اختصاص داده است (Fetzer et al., 2021). روغن کلزا به دلیل داشتن کمترین میزان اسیدهای چرب اشباع (حدود ۷ درصد) در میان روغن‌های خوراکی، از جایگاه تغذیه‌ای ممتازی برخوردار است (Siger et al., 2017). مهم‌ترین اسیدهای چرب موجود در آن شامل پالمتیک، اولئیک، لینولئیک، لینولنیک و اروسیک می‌باشد. ارقام جدید و تراریخته کلزا با دارا بودن سطح اسید اروسیک پایین (کمتر از ۲۰ گرم در کیلوگرم)، به‌طور گسترده‌ای در تولید روغن خوراکی استفاده می‌شوند (Saurabh et al., 2011; Carlsson, 2009). یکی از مهم‌ترین دلایل استفاده گسترده از روغن کلزا، دقیقاً پایین بودن همین اسید چرب اشباع‌نشده نامطلوب (اروسیک اسید) است (Channaoui et al., 2017). علاوه بر کیفیت روغن، پروتئین دانه کلزا نیز از ارزش تغذیه‌ای بالایی برخوردار بوده و حاوی مقادیر قابل توجهی از اسیدهای آمینه ضروری می‌باشد (Fischer et al., 1978). این ویژگی‌های منحصربه‌فرد، کلزا را به یک محصول استراتژیک در تأمین امنیت غذایی تبدیل کرده است.

با این وجود، گیاهان همواره در معرض عوامل تنش‌زای غیرزیستی (نظیر خشکی، شوری و دماهای بالا) و زیستی (نظیر آفات و بیماری‌ها) قرار دارند. در این میان، تنش خشکی به‌عنوان مهم‌ترین و شایع‌ترین عامل محدودکننده رشد و عملکرد گیاهان، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان شناخته می‌شود، به‌طوری‌که پروفسور مسعود هاشمی استاد علوم خاک و فیزیولوژی، تنش خشکی را ام التنش یا مادر تنش‌ها توصیف می‌کردند. تغییرات اقلیمی دهه‌های اخیر، فراوانی و شدت این تنش را افزایش داده و خسارات ناشی از آن را تشدید کرده است. وقتی گیاهان در معرض کمبود آب قرار می‌گیرند، مجموعه‌ای از تغییرات فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و مولکولی در آن‌ها رخ می‌دهد که در نهایت منجر به کاهش عملکرد نهایی می‌شود (Pirnajmedin et al., 2024). بنابراین، مطالعه تحمل نسبی به کمبود آب در گیاهان زراعی، از جمله کلزا، گامی ضروری در جهت اصلاح ارقام برای شرایط متغیر اقلیمی است. در همین راستا، تنش خشکی می‌تواند با ایجاد تغییر در پروفیل اسیدهای چرب، کیفیت روغن را تحت تأثیر قرار دهد. به‌عنوان مثال، گزارش شده است که تنش خشکی سبب افزایش درصد اسید اروسیک و کاهش اسیدهای اولئیک و لینولئیک می‌شود (Ullah et al., 2012). از سوی دیگر، واکنش‌های بیوشیمیایی ناشی از خشکی مانند تجمع اسمولیت‌ها، نقش کلیدی در تنظیم اسمزی دارند. یکی از این ترکیبات حیاتی، اسید آمینه پرولین است که در شرایط تنش شدید و متوسط در گیاه تجمع یافته و علاوه بر تأمین نیتروژن، به حفظ پتانسیل اسمزی سلول و افزایش تحمل گیاه به کم‌آبی کمک می‌کند (Fathi and Barari Tari, 2016). اگرچه تأثیر خشکی بر عملکرد دانه کلزا در مطالعات متعددی بررسی شده، اما پژوهش‌های مربوط به تأثیر آن بر کیفیت روغن و شاخص‌های بیوشیمیایی نتایج متناقضی را نشان می‌دهند. مهم‌تر اینکه، اغلب پژوهش‌ها اثر تنش را به‌صورت کلی و بدون در نظر گرفتن زمان دقیق وقوع آن در مراحل حساس زایشی (نظیر

نسخه پیش از انتشار اصلاح نشده

جدول ۱. مشخصات ژنوتیپ‌های کلزای مورد ارزیابی، شامل نام رقم، دوره رشد و منشأ

Table 1. Characteristics of the evaluated rapeseed genotypes, including cultivar name, growth period, and origin

ژنوتیپ ها Genotypes	مبدا Origin	دوره رشد Growth period
RGS003	آلمان Germany	219-224
Sarigol	آلمان Germany	219-229
Zafar	ایران Iran	220-225
Dalgon	ایران Iran	212-217
Julius	آلمان Germany	218-224
Jacomo	آلمان Germany	217-222
Jerry	آلمان Germany	220-225
Jerome	آلمان Germany	215-220
Saffar	ایران Iran	212-216
Hyola 401	کانادا Canada	220-226
Hyola 4815	کانادا Canada	217-220

گل‌دهی در مقابل خورجین‌دهی) بررسی کرده‌اند. این در حالی است که در شرایط واقعی مزرعه، احتمال وقوع تنش خشکی در هر یک از این مراحل وجود دارد و پاسخ ارقام مختلف می‌تواند کاملاً متفاوت باشد. این شکاف اطلاعاتی، به‌ویژه در مورد ارقام سازگار با مناطق تحت کشت دیم ایران، محسوس است.

با توجه به گستردگی مناطق تحت کشت دیم و مواجهه بخش قابل توجهی از دوران رشدی دانه روغنی کلزا با تنش خشکی و دماهای بالا (به‌ویژه در سایه تغییرات اقلیمی و کاهش نزولات جوی)، ارزیابی صفات مرتبط با تحمل به خشکی ضروری است. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر تنش خشکی بر تغییرات شاخص‌های کیفی و بیوشیمیایی (مانند پروفیل اسیدهای چرب) در ژنوتیپ‌های کلزا طراحی و اجرا شد تا ضمن شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل، درک بهتری از مکانیسم‌های فیزیولوژیک تحمل به خشکی در این گیاه حاصل شود.

مواد و روش‌ها

این پژوهش با هدف بررسی واکنش ژنوتیپ‌های کلزا (جدول ۱) به تنش خشکی انتهای فصل، به‌صورت اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار و به مدت دو سال زراعی (۱۳۹۹-۱۳۹۷) در مزرعه مرکز تحقیقات، آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل واقع در پارس آباد مغان اجرا گردید. تاریخ کاشت در سال اول ۲۵ مهر و در سال دوم ۳۰ مهر بود. تیمارهای آزمایشی شامل تنش خشکی به‌عنوان عامل اصلی در سه سطح (آبیاری کامل یا شاهد، تنش خشکی از مرحله

نسخه پیش از انتشار اصلاح

جدول ۲. مشخصات خواص فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه مورد آزمایش

Table2. Physical and chemical properties of the tested farm soil

عمق depth	بافت Texture	شن Sand	سیلت Silt	رس Clay	کربن آلی OC	شوری EC
cm	----------%----------					$dS\ m^{-1}$
0-27	رسی Clay	10	29	61	1.074	0.98
27-70	رسی Clay	10	27	63	1.382	0.37

جدول ۳. نتایج تجزیه خاک مزرعه طی دو سال زراعی

Table 3. Soil analysis results of the farm over two agricultural years

سال Year	اسیدیته (PH) (meq/100g)	نیتروژن (N) (٪)	پتاسیم (K) (1mg/kg)	فسفر (P) (1mg/kg)
(2018)	7.5	0.077	420	8.6
(2019)	7.6	0.067	387	8.15

جدول ۴. آمار هواشناسی (دما و بارندگی) طی سال‌های اجرای آزمایش

Table 4. Meteorological statistics (temperature and precipitation) during the experimental years

		2018-2019		2019-2020	
		متوسط دما Average temperature (°C)	بارندگی Precipitation (mm)	متوسط دما Average temperature (°C)	بارندگی Precipitation(mm)
Sep. -Oct.	مهر	18.5	20.5	22.5	27.5
Oct. -Nov.	آبان	17.5	34.5	16	37
Nov. -Dec.	آذر	15.2	39.5	16.5	40
Dec. - Jan.	دی	13.8	24.2	15	27.6
Jan. –Feb.	بهمن	8	32.2	7.5	33.8
Feb. –Mar.	اسفند	18	65.5	20	55.2
Mar. -Apr.	فروردین	22.5	4.5	25.8	40.5
Apr. –May	اردیبهشت	26.5	31.5	27	35.2
May -Jun	خرداد	32.2	10.2	35.5	8

گل‌دهی به بعد، و تنش خشکی از مرحله خورجین‌دهی به بعد) و ۱۱ ژنوتیپ کلزا به‌عنوان عامل فرعی (RGS003، Sarigol، Zafar، Dalgan، Julius، Jacomo، Jerry، Jerome، Saffar، Hyola401 و Hyola4851) بودند.

منطقه مورد مطالعه دارای اقلیم نیمه‌خشک با تابستان‌های گرم و زمستان‌های نسبتاً سرد می‌باشد. طول جغرافیایی منطقه ۴۷ درجه و ۱۸ دقیقه شمالی، عرض جغرافیایی ۳۹ درجه و ۳۹ دقیقه شرقی و ارتفاع آن ۷۸ متر از سطح دریا است. بر اساس داده‌های ایستگاه هواشناسی کشاورزی مغان (جدول ۴)، حداکثر مطلق دما در محل آزمایش ۴۲+ و حداقل آن ۱۶- درجه سلسیوس بوده و

میزان بارندگی سالانه حداقل ۹/۷۲ و حداکثر ۳۲۳ میلی‌متر می‌باشد. خاک منطقه عموماً حاصلخیز و غنی از مواد آلی است (جدول ۲). پارامترهای ظرفیت نگهداری آب در خاک با استفاده از مدل (SPAW) (Saxton & Rawls, 2006)، تخمین زده شد که بر این اساس، ظرفیت زراعی (FC) و نقطه پژمردگی دائم (PWP) به‌ترتیب ۴۳ و ۲۶ درصد حجمی برآورد گردید و آب قابل دسترس گیاه (PAW) معادل ۱۷ درصد حجمی محاسبه شد.

روش اجرای طرح و صفات مورد بررسی

آماده‌سازی زمین و کاشت به‌منظور آماده‌سازی زمین، ابتدا زمین مورد نظر آبیاری گردید و پس از گاورو شدن، توسط گاوآهن برگردان‌دار شخم زده شد. سپس برای خرد شدن کلوخه‌ها و یکنواخت شدن بستر خاک، عملیات دیسک و ماله انجام گرفت. پیش از کاشت، از خاک مزرعه در دو عمق ۰-۲۷ و ۲۷-۷۰ سانتی‌متری نمونه‌برداری به‌عمل آمد. میزان و حجم آب مصرفی در هر کرت آزمایشی با روش آبیاری سطحی و با استفاده از رابطه (۱) محاسبه گردید (مسجدی و همکاران، ۲۰۰۸). در طول هر سال در تیمار آبیاری کامل، ۷ دور آبیاری، در قطع آبیاری در مرحله گلدهی ۵ دور آبیاری و در تیمار قطع آبیاری در مرحله خورجین دهی، ۲ دور آبیاری انجام شد. جزئیات حجم آب کاربردی برای هر تیمار در دو سال آزمایش، در بخش نتایج ارائه شده است.

$$V = I \times A \times 100 \qquad (۱)$$

V: حجم آب آبیاری‌شده در هر کرت (لیتر)؛ I: ارتفاع آب آبیاری (متر)؛ A: مساحت هر کرت (مترمربع).

مدیریت تغذیه و کنترل علف‌های هرز

بر اساس نتایج تجزیه خاک و توصیه کودی، بخشی از کود نیتروژن (به‌شکل اوره) و تمامی کود فسفره و پتاسه مورد نیاز (به‌ترتیب به‌شکل فسفات آمونیوم و سولفات پتاسیم به میزان ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار) قبل از آخرین دیسک در سطح مزرعه پاشیده شد. هم‌زمان، علف‌کش ترفلان به میزان ۵/۲ لیتر در هکتار به‌طور یکنواخت پخش و با استفاده از دیسک سبک، کود و علف‌کش با خاک مخلوط گردید. به‌منظور استفاده بهینه از نیتروژن، باقی‌مانده کود نیتروژنه (به‌شکل سولفات آمونیوم) به‌صورت سرک در دو مرحله شروع ساقه‌رفتن و ظهور اولین غنچه‌های گل مصرف شد.

طرح کاشت و اندازه‌گیری صفات زراعی

هر کرت آزمایشی شامل ۶ خط کاشت به طول ۶ متر با فاصله بین ردیف ۳۰ سانتی‌متر و فاصله بوته روی ردیف ۵ سانتی‌متر بود. از این تعداد، ۲ ردیف کناری به‌عنوان حاشیه و ۴ ردیف میانی برای تعیین عملکرد دانه، درصد روغن و عملکرد روغن دانه اختصاص یافت. برای اندازه‌گیری عملکرد دانه، بوته‌های هر کرت کف‌بُر شده و با استفاده از کمباین مخصوص آزمایش‌ها (وینتراشتایگر)، دانه‌ها از خورجین‌ها جدا و عملکرد دانه هر کرت تعیین گردید.

استخراج و اندازه‌گیری درصد روغن

استخراج روغن از بذرهای کلزا با استفاده از حلال دی‌اتیل‌اتر انجام شد. ابتدا ۵ گرم بذر پس از جداسازی ناخالصی‌ها، در آون با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک گردید. سپس بذرهای خشک‌شده خرد شده و ۲ گرم از آن در لوله آزمایش قرار گرفت. به هر لوله حدود ۱۰ میلی‌لیتر دی‌اتیل‌اتر افزوده و محلول با دستگاه ورتکس مخلوط‌سازی شد. محتویات لوله‌ها به ویال‌های ۵۰ میلی‌لیتری انتقال یافته و به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۱۰ هزار دور در دقیقه سانتریفیوژ گردید. پس از جداسازی تفاله، مایع رویی (حاوی دی‌اتیل‌اتر و روغن) جمع‌آوری و به لوله آزمایش از پیش وزن‌شده منتقل شد. حلال در آون با دمای ۳۰ درجه سانتی گراد تبخیر و وزن روغن از اختلاف وزن لوله محاسبه گردید. درصد روغن تیمارها در آزمایشگاه ملی تحقیقات دانه‌های روغنی مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر اندازه‌گیری شد. در نهایت، با ضرب درصد روغن در عملکرد دانه هر کرت، عملکرد روغن محاسبه گردید.

پیش از انتشار اصلاح نشده

آنالیز ترکیب اسیدهای چرب

برای تعیین ترکیب اسیدهای چرب، استرهای متیل اسید چرب با استفاده از دستگاه کروماتوگرافی گازی (GC مدل ۶۸۹۰) تجزیه شدند. این آنالیزها در آزمایشگاه ملی تحقیقات دانه‌های روغنی کشور (کرج) انجام گردید. پیش از تزریق به GC، نمونه‌ها طبق روش بدینگ و دیجونگ آماده‌سازی شدند (Badings & De Jong, 1983). مخلوط حاصل در دمای اتاق به مدت یک دقیقه به‌شدت هم زده و سپس در ۱۵۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ گردید. لایه رویی با میکروسرنگ تمیز جدا و پس از عبور از صافی ۲۲/۰ میکرومتری به میکروتیوب منتقل شد. محلول صاف‌شده به دستگاه GC تزریق و شناسایی اسیدهای چرب بر اساس روش نرمالیزاسیون و استاندارد خارجی صورت گرفت.

تجزیه و تحلیل داده ها

پیش از تجزیه واریانس، نرمال بودن توزیع داده‌ها با آزمون‌های مربوطه تأیید گردید. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Mstat-c (نسخه ۱/۴۲) و مقایسه میانگین‌ها به روش آزمون توکی (Tukey) در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. رسم نمودارها نیز با نرم‌افزار Excel صورت گرفت. مدل آماری: این پژوهش به‌صورت اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی و در دو سال اجرا گردید. در این مدل، سال (Y)، تیمار تنش خشکی (A) و اثر متقابل آن‌ها (A×Y) به‌عنوان عوامل اصلی با استفاده از خطای آزمایشی اول (با ۸ درجه آزادی، حاصل از اثرات متقابل تکرار × سال × A) آزمون شدند. فاکتور فرعی شامل ۱۱ ژنوتیپ (B) بود و اثرات مربوط به آن (B, B×Y, B×A, B×A×Y) با استفاده از خطای آزمایشی دوم (با ۱۲۰ درجه آزادی، حاصل از تجمیع اثرات متقابل غیرمعنی‌دار) آزمون گردید.

نتایج و بحث

حجم آب مصرفی در تیمارهای آزمایشی

بر اساس محاسبات انجام‌شده با کنتور حجمی و با استفاده از رابطه (۱)، مجموع حجم آب مصرفی در هر تیمار به‌صورت تجمعی برای هر سال زراعی محاسبه گردید. در سال اول، تیمار آبیاری کامل (شاهد) ۵۳۵۰ مترمکعب در هکتار آب دریافت کرد، درحالی‌که این مقدار برای تیمارهای تنش خشکی پس از گل‌دهی و پس از خورجین‌دهی به‌ترتیب ۳۱۴۰ و ۲۱۸۰ مترمکعب در هکتار بود. این مقادیر در سال دوم برای تیمارهای مذکور به‌ترتیب ۵۱۶۰، ۳۰۲۵ و ۲۰۹۰ مترمکعب در هکتار ثبت شد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، قطع آبیاری در مراحل زایشی منجر به کاهش قابل توجه حجم آب مصرفی در تیمارهای تحت تنش نسبت به شاهد گردید، به‌طوری‌که شدیدترین محدودیت آبی در تیمار قطع آبیاری از مرحله خورجین‌دهی رخ داد.

ارتباط پروفیل اسیدهای چرب و گلوکوزینولات‌ها با مکانیسم‌های تحمل به خشکی

نکته محوری در این پژوهش، تبیین ارتباط بین تغییرات پروفیل اسیدهای چرب و گلوکوزینولات‌ها با مکانیسم‌های تحمل به خشکی است. اگرچه این صفات عمدتاً به‌عنوان شاخص‌های کیفی روغن شناخته می‌شوند، اما تغییرات جهت‌دار آن‌ها تحت تنش، اطلاعات ارزشمندی از استراتژی تطبیقی گیاه فراهم می‌کند. اسیدهای چرب غیراشباع با حفظ سیالیت غشاهای سلولی، نقش حیاتی در بقای گیاه تحت تنش اسمزی ایفا می‌کنند. بنابراین، افزایش شدید اسید اروسیک در برخی ارقام (نظیر Zafar) نه‌تنها یک افت کیفی، بلکه نشانه‌ای از عدم تعادل متابولیک و حساسیت فیزیولوژیک به خشکی تلقی می‌شود. در مقابل، ارقامی که پایداری بیشتری در حفظ پروفیل اسیدهای چرب خود داشتند (مانند Jerome)، احتمالاً از مکانیسم‌های کارآمدتری برای محافظت از غشاها برخوردارند. از سوی دیگر، گلوکوزینولات‌ها به‌عنوان متابولیت‌های ثانویه، در تنظیم اسمزی و مهار گونه‌های فعال اکسیژن در شرایط تنش نقش دارند. افزایش کنترل‌شده این ترکیبات می‌تواند بخشی از پاسخ تطبیقی گیاه برای مقابله با خسارت اکسیداتیو ناشی از خشکی باشد. لذا، پایش هم‌زمان این شاخص‌های بیوشیمیایی، نه صرفاً برای ارزیابی کیفیت، بلکه به‌عنوان بیومارکر[1]های فیزیولوژیک تحمل، مبنای علمی این پژوهش برای غربالگری ژنوتیپ‌ها قرار گرفته است.

نسخه پیش از انتشار اصلاح نشده

جدول ۵. شاخص‌های تحمل به خشکی (تنش آبیاری بعد از گلدهی) برای ارقام مورد آزمایش

Table 5. Drought tolerance indices (irrigation stress after flowering) for the tested cultivars

STI	GMP	SSI	MP	TOL	Ys	Yp	ارقام Cultivars
0/69	2533.1	1.01	2644.5	1519	1885	3404	RGS003
0/44	2033.9	1.13	2155.5	1429	1441	2870	Sarigol
0/64	2450.8	0.97	2547	1390	1852	3242	Zafar
0/73	2610.9	1.11	2760.5	1793	1864	3657	Dalgan
0/61	2380.3	1.03	2490.5	1467	1757	3224	Julius
0/54	2256	1.09	2378	1504	1626	3130	Jacomo
0/48	2124	1.06	2229	1352	1553	2905	Jerry
0/4	1942.1	1.02	2028	1168	1444	2612	Jerome
0/65	2466.2	0.47	2482.5	573	2196	2769	Saffar
0/56	2279.5	1.00	2375	1334	1708	3042	Hyola 401
0/45	2045.3	1.04	2142.5	1277	1504	2781	Hyola 4815

شاخص‌های تحمل و حساسیت به خشکی بر مبنای عملکرد دانه

به‌منظور شناسایی دقیق‌تر ژنوتیپ‌های متحمل، شاخص‌های تحمل و حساسیت به خشکی شامل شاخص تحمل به تنش (STI)[1]، شاخص پایداری عملکرد (YSI)[2] و شاخص حساسیت به خشکی (SSI)[3] بر مبنای عملکرد دانه در شرایط بدون تنش (Yp)[4] و تحت تنش (Ys)[5] برای هر ژنوتیپ محاسبه گردید (جدول ۵). در بین ارقام مورد بررسی در شرایط تنش پس از گل‌دهی، رقم Dalgan بیشترین عملکرد را در شرایط نرمال و نیز بیشترین مقادیر شاخص‌های GMP[6]، MP[7]، TOL[8] و STI را به خود اختصاص داد. این رقم همچنین پس از Sarigol، بیشترین شاخص SSI را نشان داد. رقم Saffar نیز بیشترین عملکرد دانه در شرایط تنش و بیشترین شاخص HM[9] را به خود اختصاص داد. شایان ذکر است که رقم RGS003 نیز از نظر عملکرد دانه در هر دو شرایط تنش و بدون تنش و شاخص‌های GMP، MP، TOL و STI در جایگاه بالایی قرار داشت. بر اساس این نتایج، ارقام Dalgan و RGS003 بیشترین مقاومت به تنش خشکی پس از مرحله گل‌دهی را نشان دادند.

همبستگی شاخص‌های تحمل با عملکرد دانه در این مطالعه، عملکرد در شرایط آبیاری کامل (Yp) و عملکرد در شرایط تنش پس از گل‌دهی (Ys) با شاخص‌های STI، HM و GMP همبستگی مثبت و معنی‌داری نشان دادند. با این‌حال، همبستگی معنی‌داری بین Yp با شاخص‌های SSI و HM مشاهده نگردید. همچنین، Ys با شاخص TOL نیز همبستگی معنی‌داری نداشت (جدول ۶). شاخص‌های مقاومت به خشکی، توانایی ژنوتیپ‌ها را در حفظ عملکرد تحت شرایط تنش نشان می‌دهند؛ بنابراین، مقادیر بالای این شاخص‌ها می‌تواند بیانگر پتانسیل بالای عملکرد ژنوتیپ در هر دو شرایط تنش و بدون تنش باشد (Reza et al., 2017). در همین راستا، عینی نرگسه و همکاران (۲۰۲۰) نیز همبستگی مثبت و معنی‌داری را بین عملکرد دانه کلزا و شاخص‌های مقاومت به خشکی گزارش نمودند.

1- (STI) Stress Tolerance Index
2- (YSI) Yield Stability Index
3- (SSI) Stress Susceptibility Index
4- (Yp) Yield under normal (non-stress) conditions
5- (Ys) Yield under stress conditions
6- (GMP) Geometric Mean Productivity
7- (MP) Mean Productivity
8- (TOL) Tolerance Index
9- (HM) Harmonic Mean

نسخه پیش از انتشار اصلاح شده

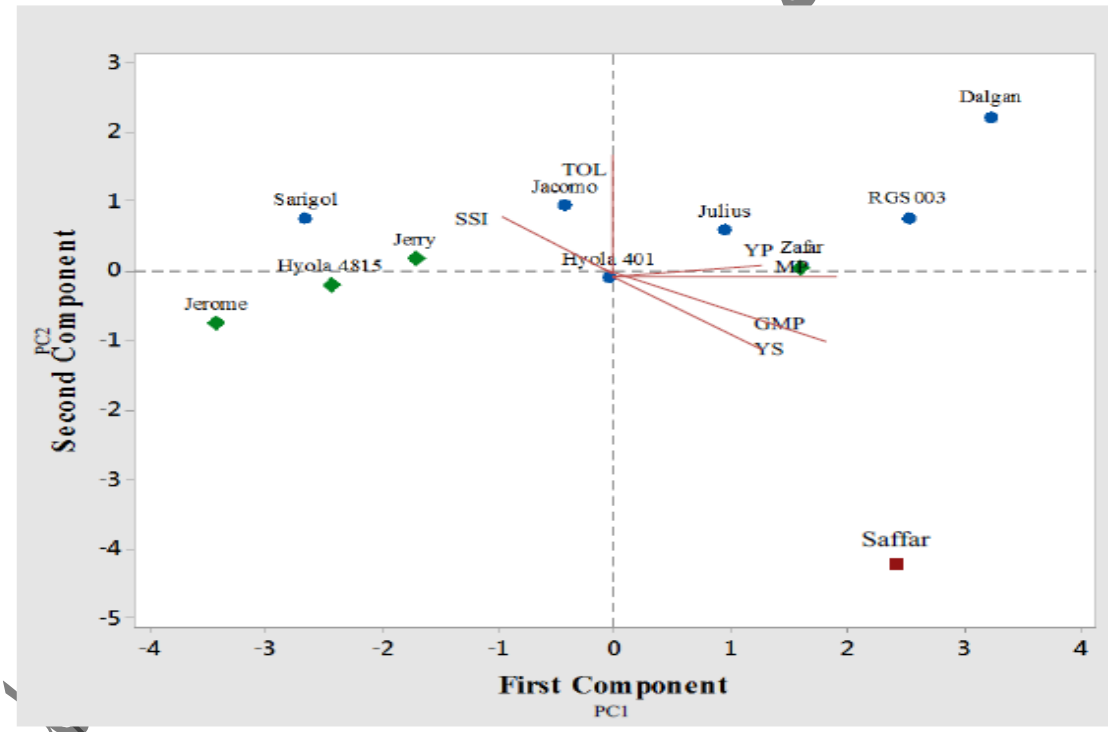
جدول ۶. همبستگی بین شاخص‌های مقاومت به تنش آبی و عملکرد دانه تحت دو شرایط تنش بعد از گلدهی و عدم تنش خشکی

Table 6. Correlation between water stress resistance indices and grain yield under two stress conditions: post-flowering and no drought stress.

SSI	STI	TOL	MP	HM	GMP	Ys	Yp	
							1	Yp
						1	0/406	Ys
					1	0/863**	0/811**	GMP
				1	0/946**	0/979**	0/579	HM
			1	0/89**	0/989**	0/782**	0/877**	MP
		1	0/315	-0/152	0/175	-0/345	0/718*	TOL
	1	0/183	0/99**	0/944**	0/999**	0/858**	0/815**	STI
1	-0/284	0/887**	-0/15	-0/583	-0/291	-0/73*	0/322	SSI

* و ** معنی‌داری در سطح پنج و یک درصد است.

* and ** are significant at the five and one percent levels.



شکل ۱. پراکنش ژنوتیپ‌های کلزا و موقعیت شاخص‌های تحمل خشکی در بای پلات حاصل از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی در تیمار قطع آبیاری از مرحله گلدهی

Figure 1. Distribution of oilseed rape genotypes and the position of drought tolerance indices in the biplot derived from principal components analysis in irrigation withhold from flowering stage treatment

تجزیه واریانس صفات کیفی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تنش خشکی تأثیر معنی‌داری بر اسیدهای چرب اشباع و غیراشباع داشته و سبب ایجاد تغییرات عمده‌ای در پروفیل اسیدهای چرب دانه گردید. همچنین، تنش خشکی تغییرات قابل توجهی را در صفات زراعی و فنولوژیک ایجاد نمود. ارقام مختلف نیز از نظر میزان اسیدهای چرب اشباع

جدول ۷. تجزیه واریانس اسیدهای چرب

Table7. Analysis of Variance (ANOVA) for Fatty Acid Composition

منابع تغییرات Sources of variation	درجه آزادی d.f	اسید پالمتیک Palmitic acid	اسید لینولنیک Linolenic acid	اسید لینولئیک Linoleic acid	اسید اولئیک Oleic acid	اسید اروسیک Erucic acid	گلوکوزینولات Glucosinolate
سال (Y)	1	8.469 ns	0.982 ns	23.076 ns	15.611 ns	0.005*	21.312 ns
تکرار (Repetition)	4	2.433	2.445	35.783	84.507	0.0005	6.926
تیمار تنش خشکی (A) Drought stress treatment	2	37.253*	108.221**	253.208**	243.802**	0.552**	725.889**
Y×A	2	0.634 ns	0.045 ns	0.195 ns	0.614 ns	0.001 ns	1.663 ns
خطای ۱(Error 1)	8	1.141	1.211	6.395	12.472	0.003	0.894
ژنوتیپ (B) (Genotype, B)	10	0.285**	1.113**	3.502**	17.114**	0.005**	6.25**
Y×B	10	0.01 ns	0.009 ns	0.008 ns	0.008 ns	0.0001 ns	0.0 41 ns
A×B	20	0.18**	0.559**	1.339**	1.301**	0.003**	2.926**
Y×A×B	20	0.005 ns	0.007 ns	0.004 ns	0.009 ns	0.00005 ns	0.023 ns
خطای ۲ (Error 2)	120	0.038	0.078	1.124	5.252	0.00021	0.85
ضریب تغییرات (٪) (coefficient of variation)		3.92	5.02	5.66	3.81	4.93	8.09

ns: غیر معنی دار، **: اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۱٪، *: اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵٪.

ns: non significant, **: significant at 1% probability, *: significant at 5% .

و غیراشباع با یکدیگر تفاوت معنی‌داری داشتند. اثر متقابل تنش خشکی و رقم بر میزان اسیدهای چرب اشباع و غیراشباع در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۷).

واکنش متفاوت ارقام به تنش خشکی

به عبارت دیگر، ارقام مختلف کلزا واکنش‌های متفاوتی به تنش خشکی نشان دادند. برخی ارقام تحت تنش، تغییرات محدودتری در ترکیب اسیدهای چرب داشتند که می‌تواند نشان‌دهنده تحمل بالاتر باشد. این اثر متقابل مؤکداً نشان می‌دهد که انتخاب ارقام متحمل به خشکی (با قابلیت حفظ کیفیت روغن) در برنامه‌های اصلاحی کلزا ضروری است. علاوه بر این، تنش خشکی تغییرات قابل توجهی در درصد و عملکرد روغن ایجاد کرد که اغلب با محدود شدن انتقال متابولیت‌ها به دانه همراه بود. این تغییرات می‌تواند عامل اصلی کاهش سنتز اسیدهای چرب اشباع‌شده باشد، چراکه تنش خشکی فعالیت آنزیم‌های کلیدی این مسیر را کاهش می‌دهد. در نهایت، نتایج تأکید می‌کند که در مناطق مستعد خشکی، گزینش ارقام با پاسخ فیزیولوژیک مطلوب می‌تواند هم به حفظ کیفیت روغن کلزا و هم به افزایش پایداری تولید منجر شود.

درصد روغن

نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان داد که عملکرد دانه به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر اثرات ساده زمان تنش خشکی و رقم قرار گرفت (جدول ۸). در این بررسی، تنش پس از گل‌دهی تأثیر معنی‌داری بر درصد روغن کلزا نداشت. همچنین، تنش پس از خورجین‌دهی نیز نتوانست تأثیر معنی‌داری بر درصد روغن اعمال کند، به‌طوری‌که درصد روغن در این تیمار (۶/۴۱ درصد) تفاوت معنی‌داری با تیمار شاهد (۶/۴۱ درصد) نشان نداد (شکل ۲).

نسخه پیش از انتشار اصلاح نشده

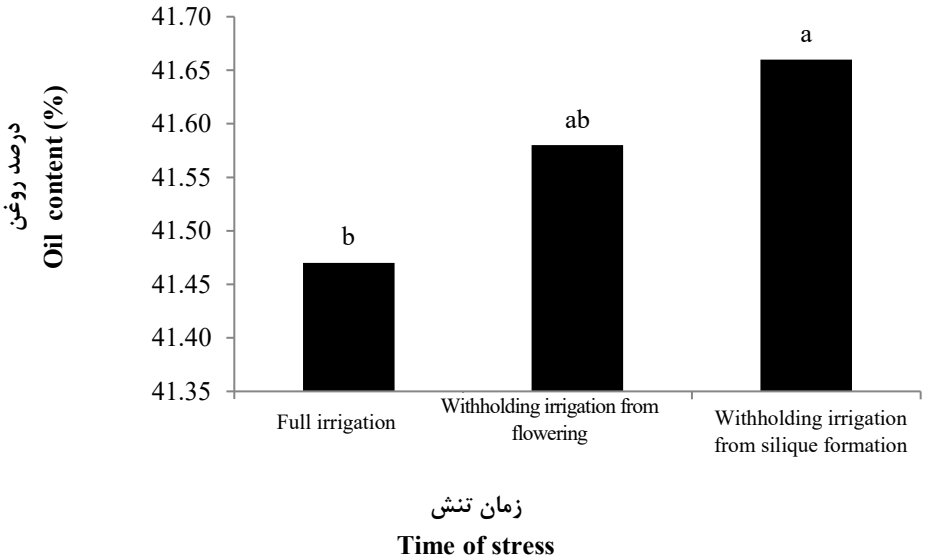
جدول ۸. تجزیه واریانس مرکب برخی صفات مورد ارزیابی

Table 8. Composite analysis of variance of some evaluated traits

میانگین مربعات		درجه آزادی	منابع تغییرات
عملکرد روغن Oil performance	درصد روغن Oil percentage	d.f	Sources of variation
13398.94 ns	0.102 ns	1	سال (Y)
146182.2*	71.421*	4	تکرار (Repetition)
5216706.9*	0.61*	2	تیمار تنش خشکی (A) Drought stress treatment
33580.23 ns	0.086 ns	2	Y×A
34220.63	0.081	8	خطای ۱(Error 1)
165838.812*	11.473**	10	ژنوتیپ (B) (Genotype, B)
17956.06 ns	0.022 ns	10	Y×B
37888.25*	0.093 ns	20	A×B
23940.33 ns	0.027 ns	20	Y×A×B
18890.35	0.085	120	خطای ۲(Error 2)
14.18	0.7		ضریب تغییرات (٪)(coefficient of variation)

ns: عدم اختلاف معنی‌دار، **: اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪، *: اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪

ns: no significant, **: significant at 1% probability, *: significant at 5%.

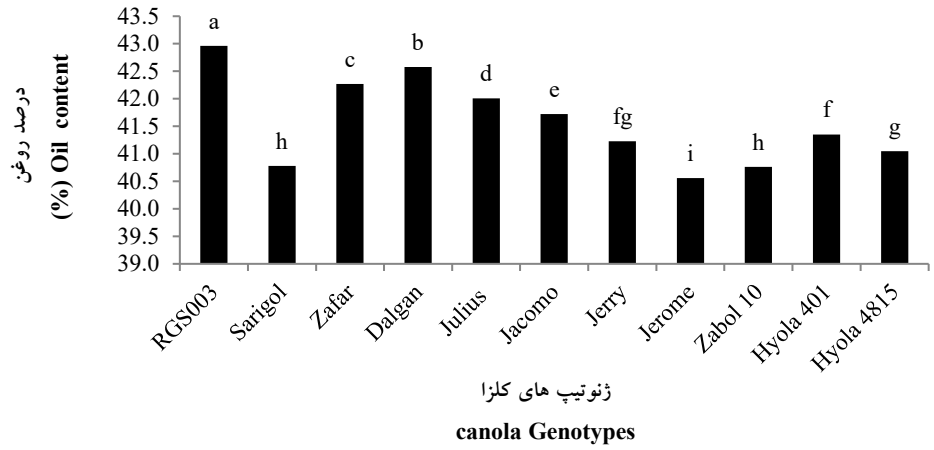


شکل ۲. مقایسه میانگین درصد روغن دانه تحت تاثیر زمان تنش خشکی

تفاوت بیانگر اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد

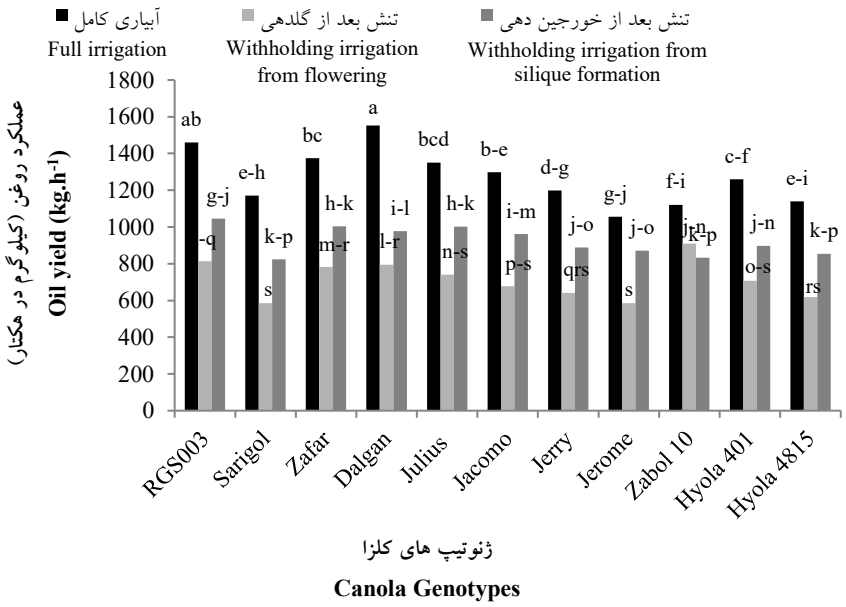
Figure2. Comparison of mean seed oil percentages affected by drought stress time
Difference indicates significant difference at 5% probability level

نسخه پیش از انتشار (پذیرفته شده)



شکل ۳. مقایسه میانگین درصد روغن دانه در ارقام مورد بررسی کلزا
تفاوت بیانگر اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد

Figure 3. Comparison of the averages of seed oil percentage in the studied rapeseed cultivars
Difference indicates a significant difference at the 5% probability level



شکل ۴. مقایسه میانگین عملکرد روغن دانه تحت تاثیر زمان تنش خشکی در ارقام مورد بررسی کلزا
تفاوت بیانگر اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد

Figure 4. Comparison of average seed oil yield under the influence of drought stress time in the studied rapeseed cultivars
Difference indicates a significant difference at the 5% probability level.

از نظر مقایسه ارقام، بیشترین درصد روغن دانه با ۹۶/۴۲ درصد در رقم RGS003 به‌دست آمد. پس از این رقم، ارقام Dalgan، Zafar و Julius به‌ترتیب بیشترین درصد روغن را به خود اختصاص دادند. در مقابل، کمترین درصد روغن دانه با ۵۶/۴۰ درصد به رقم Jerome تعلق داشت (شکل ۳).

مطالعات پیشین نیز مؤید وجود تنوع ژنتیکی قابل توجه در

صفت درصد روغن کلزا هستند. زبرجدی و همکاران (Zebarjadi et al., 2011) با بررسی ۱۴ رقم کلزا، اختلاف معنی‌داری را بین ارقام از نظر درصد روغن گزارش نمودند. در تحقیق دیگری نیز تفاوت معنی‌دار بین ژنوتیپ‌های مختلف کلزا از نظر این صفت به‌دست آمده است (Sher et al., 2017). یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر این اختلاف، تفاوت در طول دوره پر شدن دانه در ژنوتیپ‌های مختلف گزارش شده است.

عملکرد روغن

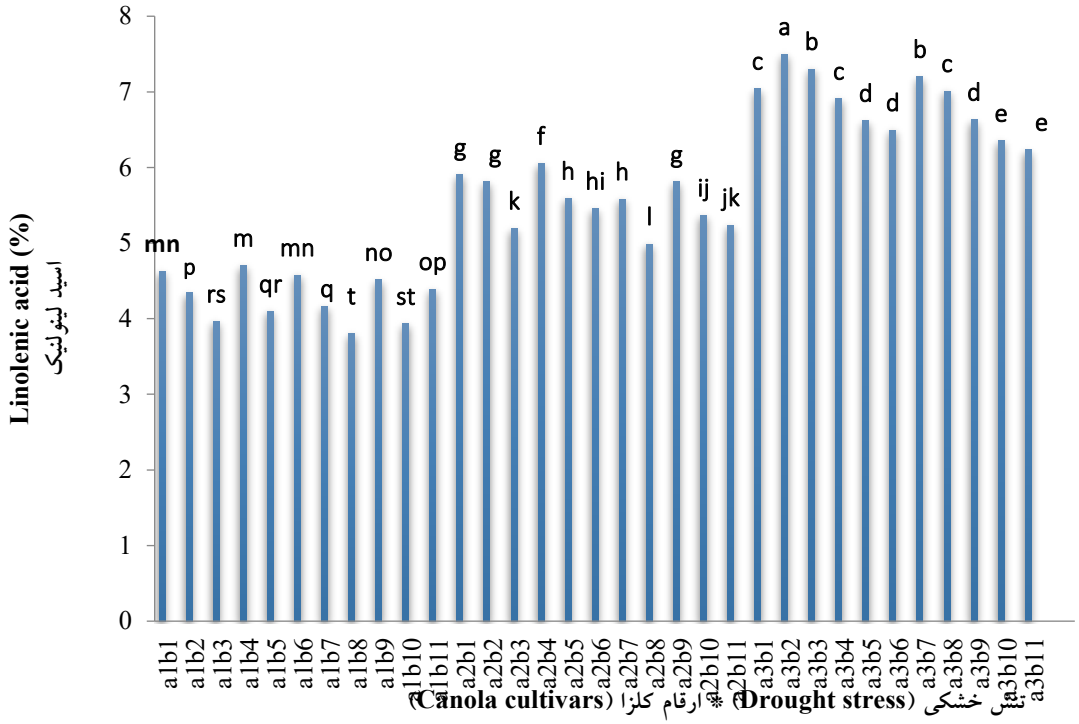
نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان داد که عملکرد روغن به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر برهم‌کنش زمان تنش خشکی و رقم قرار گرفت (جدول ۸). در این مطالعه، بیشترین عملکرد روغن دانه با ۱۵۵۳ کیلوگرم در هکتار در تیمار آبیاری کامل و رقم Dalgan به‌دست آمد، درحالی‌که کمترین عملکرد روغن با ۵۸۴ کیلوگرم در هکتار به تیمار تنش خشکی پس از گل‌دهی و رقم Jerome تعلق داشت. در شرایط آبیاری کامل، ارقام RGS003 و Dalgan بیشترین و ارقام Sarigol، Jerry، Jerome، Saffar و RGS003 کمترین عملکرد روغن دانه را به خود اختصاص دادند. در تیمار تنش پس از خورجین‌دهی، بیشترین عملکرد روغن دانه در رقم RGS003 و کمترین آن در ارقام Sarigol و Saffar مشاهده گردید. در تیمار تنش خشکی پس از گل‌دهی، بیشترین عملکرد روغن دانه با ۹۰۸ کیلوگرم در هکتار متعلق به رقم Saffar و کمترین آن با ۵۸۵ و ۵۸۴ کیلوگرم در هکتار به‌ترتیب متعلق به ارقام Sarigol و Jerome بود. اعمال تنش خشکی پس از گل‌دهی در تمامی ارقام، بیشترین کاهش عملکرد روغن دانه را به‌دنبال داشت. به‌طوری‌که در ارقام RGS003، Sarigol، Zafar، Dalgan، Julius، Jacomo، Jerry، Jerome، Saffar، Hyola 401 و Hyola 4815، عملکرد روغن به‌ترتیب ۳/۴۴، ۵۰، ۱/۴۳، ۸/۴۸، ۱/۴۵، ۷/۴۷، ۵/۴۶، ۶/۴۴، ۹/۱۸، ۸/۴۳ و ۷/۴۵ درصد کاهش یافت. بر این اساس، رقم Saffar با ۹/۱۸ درصد کاهش، کمترین افت عملکرد روغن را در مواجهه با تنش خشکی پس از گل‌دهی تجربه نمود. مطالعات پیشین نیز مؤید تأثیر منفی کم‌آبی بر عملکرد کمی و کیفی کلزا هستند. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که تنش خشکی اثر معنی‌داری بر عملکرد دانه و روغن کلزا دارد و عملکرد روغن از طریق کاهش درصد روغن و به‌ویژه کاهش عملکرد دانه، تحت تأثیر کم‌آبی قرار می‌گیرد (Zarei et al., 2010). در بررسی‌های دیگر نیز اختلاف معنی‌دار بین ارقام کلزا از نظر عملکرد روغن گزارش شده است که این تفاوت، عمدتاً به اختلاف در درصد روغن و وزن دانه تولیدی ارقام نسبت داده می‌شود (Chaghakaboodi et al., 2017; Zebarjadi et al., 2011; Sher et al., 2017). نتایج مطالعه حاضر نیز تأیید می‌کند که در شرایط تنش خشکی پس از خورجین‌دهی و پس از گل‌دهی، ارقام مورد بررسی واکنش متفاوتی از نظر عملکرد روغن نشان دادند و این واکنش، کاملاً وابسته به رقم و شدت تنش بود.

روفیل اسیدهای چرب

اسید پالمتیک

نتایج این تحقیق نشان داد که اثر متقابل تنش خشکی و رقم بر درصد اسید پالمتیک معنی‌دار است، به‌طوری‌که بیشترین مقدار این اسید چرب اشباع (۶ درصد) در تیمار آبیاری کامل و رقم Zafar مشاهده شد. پس از آن، تیمار آبیاری کامل با ارقام Julius و Jerome قرار داشت. کمترین میزان (۹/۳ درصد) مربوط به تنش خشکی در مرحله خورجین‌دهی و رقم Jerry بود. اختلاف آماری میان بیشینه و کمینه معادل ۱/۲ درصد، قابل توجه ارزیابی شد (جدول ۵). ارقام کلزا واکنش متفاوتی به تنش نشان دادند. رقم‌های Zafar و Jerome بیشترین کاهش و رقم‌های Hyola4851 و Jacomo کمترین کاهش را در درصد اسید پالمتیک تجربه کردند. به‌طور کلی، تنش خشکی باعث کاهش معنی‌دار این اسید چرب اشباع شد که با یافته‌های پیشین (Sooran et al., 2020؛ Rezaeizad et al., 2019؛ Kayaçetin et al., 2018) همسو است. علت این کاهش را می‌توان به نقش آنتی‌اکسیدانت‌های گیاهی (با فعالیت متفاوت در ارقام مختلف) نسبت داد که از اسیدهای چرب در برابر تنش محافظت می‌کنند (Kayaçetin et al., 2018).

نسخه پیش از انتشار

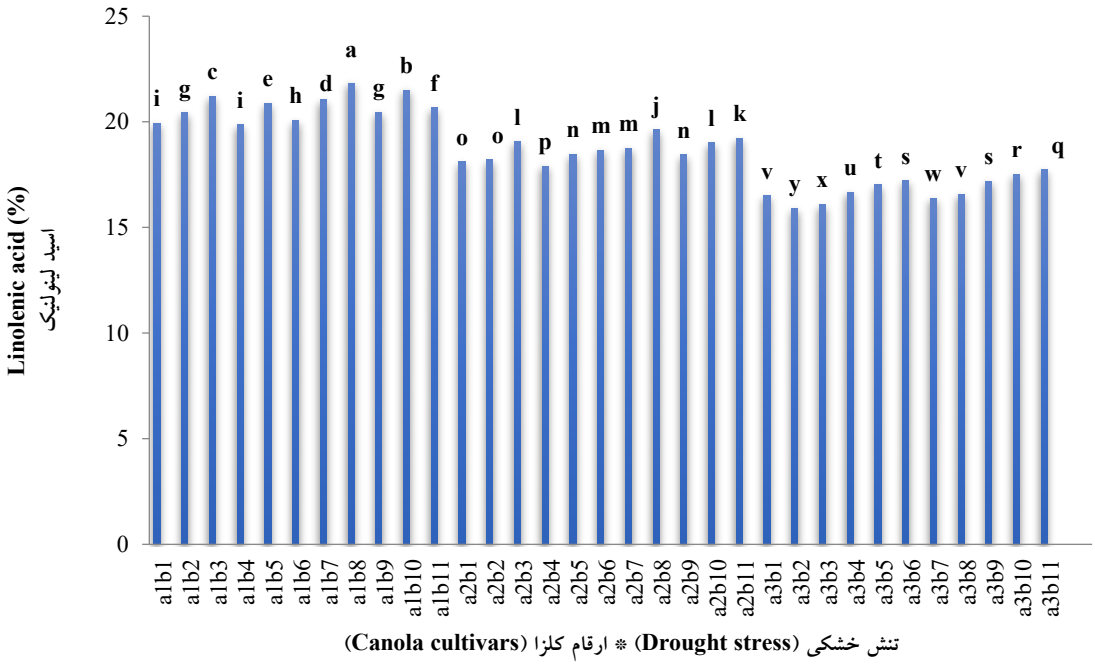


شکل ۴. مقایسه میانگین درصد اسید لینولنیک در ارقام مورد بررسی کلزا تحت تأثیر تیمار تنش خشکی. a1 (آبیاری کامل)، a2 (تنش خشکی پس از خورجین‌دهی)، a3 (تنش پس از گل‌دهی) و b: (ارقام کلزا) به‌ترتیب از(RGS003، Sarigol، Zafar، Dalgan، Julius، Jacomo، Jerry، Jerome، Saffar، Hyola401 و Hyola ۴۸۵۱). (حروف متفاوت بیانگر اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد است)

Fig. 5. Mean comparison percentages of linolenic acid in the studied rapeseed cultivars under the influence of drought stress levels. Linolenic acid : a1 (full irrigation), a2 (Drought stress after pod setting), and a3 (Drought stress after flowering); and cultivars (b): RGS003, Sarigol, Zafar, Dalgan, Julius, Jacomo, Jerry, Jerome, Saffar, Hyola401, and Hyola4815, respectively (Different letters indicate significant differences at the 5% probability level)

اسید لینولنیک

نتایج نشان داد که اثر متقابل تنش خشکی و رقم بر درصد اسید لینولنیک معنی‌دار است (شکل ۴). بیشترین مقدار این اسید چرب غیراشباع (۷/۵ درصد) در تیمار تنش خشکی در مرحله خورجین‌دهی و رقم «Sarigol» مشاهده شد. پس از آن، تیمار مشابه با ارقام Zafar و Jerry قرار داشت. کمترین میزان (۳/۸ درصد) مربوط به تیمار آبیاری کامل و رقم Jerome بود. دامنه تغییرات ۲/۷ درصدی بین بیشینه و کمینه، حاکی از تأثیر قابل‌توجه تنش و رقم است. به‌طور کلی، اعمال تنش خشکی از مرحله گلدهی به بعد در همه ارقام، باعث کاهش درصد اسید لینولنیک شد. این یافته با گزارش‌های پیشین همسو است (Kayaçetin et al., 2018) که نشان می‌دهند در شرایط خشکی، درصد اسیدهای چرب غیراشباع (از جمله لینولنیک) کاهش می‌یابد، درحالی‌که اسیدهای چرب اشباع افزایش نسبی می‌یابند. بین ارقام از نظر درصد اسید لینولنیک در همه تیمارهای تنش خشکی تفاوت معنی‌داری وجود داشت. این پاسخ متفاوت به عواملی چون: فعالیت آنزیم‌های سنتزکننده اسیدهای چرب، میزان فراورده‌های فتوسنتزی، عناصر معدنی مؤثر و سطح آنتی‌اکسیدانت‌های دانه نسبت داده می‌شود (Liersch et al., 2020). مطالعات دیگر نیز نتایج مشابهی گزارش کرده‌اند(Pokharel, 2013؛ Sooran et al., 2020؛ Rezaeizad et al., 2019). به‌عنوان نمونه، تحقیقی بر روی ارقام مختلف کلزا



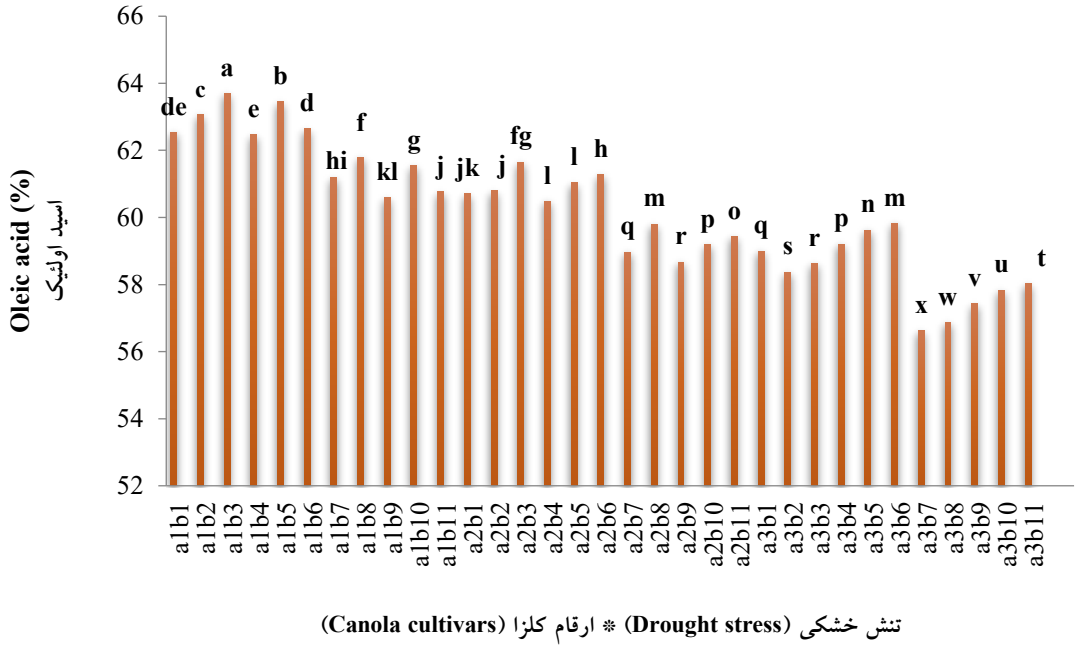
شکل ۵. مقایسه میانگین درصد اسید چرب لینولئیک در ارقام مورد بررسی کلزا تحت تأثیر تنش خشکی a1 (آبیاری کامل)، a2 (تنش خشکی پس از خورجین‌دهی)، a3 (تنش پس از گل‌دهی)، b: (ارقام کلزا) به‌ترتیب از (RGS003، Sarigol، Zafar، Dalgan، Julius، Jacomo، Jerry، Jerome، Saffar، Hyola401 و Hyola ۴۸۵۱). (حروف متفاوت بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد)

Fig. 5. Mean comparison percentages of linoleic fatty acid in the studied rapeseed cultivars under the influence of drought stress levels : a1 (full irrigation), a2 (Drought stress after pod setting), and a3 (Drought stress after flowering); and cultivars (b): RGS003, Sarigol, Zafar, Dalgan, Julius, Jacomo, Jerry, Jerome, Saffar, Hyola401, and Hyola4815, respectively (Different letters indicate significant differences at the 5% probability level)

نشان داد که تنش خشکی در مرحله گلدهی و خورجین‌دهی، درصد اسید لینولنیک را کاهش می‌دهد (Rezaeizad et al., 2019). این کاهش عمدتاً ناشی از کاهش کارایی آنزیم ω-3 desaturase و اختلال در انتقال اسیدهای چرب از پلاستید به سیتوزول است که تبدیل لینولئیک اسید به لینولنیک اسید را محدود می‌کند (Elferjani & Soolanayakanahally, 2018). همچنین، Kandil و همکاران (۲۰۱۷) نیز کاهش مشابهی را تحت تنش خشکی تأیید کرده‌اند.

اسید لینولئیک

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل تنش خشکی و رقم بر درصد اسید لینولئیک معنی‌دار است (شکل ۵). بیشترین مقدار این اسید چرب غیراشباع (۲۲ درصد) در تیمار آبیاری کامل و رقم Jerome مشاهده شد. پس از آن، ترکیب‌های تیماری «آبیاری کامل + رقم RGS003» و «آبیاری کامل + رقم Zafar» قرار داشتند. در شرایط آبیاری کامل، بیشترین میزان اسید لینولئیک حاصل گردید. تنش خشکی در مراحل آغاز گلدهی و خورجین‌دهی باعث کاهش درصد این اسید چرب شد. میزان کاهش در مرحله خورجین‌دهی بیشتر از مرحله گلدهی بود. این موضوع با یافته‌های پیشین همسو است: مرحله خورجین‌دهی و رشد خورجین حس‌آورترین مرحله به تنش‌های مؤثر بر تشکیل روغن دانه‌ها محسوب می‌شود (Liersch et al., 2020؛ Rezaeizad et al., 2019). سایر پژوهش‌ها نیز کاهش معنی‌دار درصد اسید لینولئیک را در اثر تنش خشکی در مراحل گلدهی و خورجین‌دهی تأیید کرده‌اند (Sooran et al., 2020). ارقام کلزا



شکل ۶. مقایسه میانگین درصد اسید چرب اولئیک در ارقام مورد بررسی کلزا تحت تأثیر تیمارتنش خشکی :a1 (آبیاری کامل)، a2 (تنش خشکی پس از خورجین‌دهی)، a3 (تنش پس از گل‌دهی)، b: (ارقام کلزا) به‌ترتیب از(RGS003، Sarigol، Zafar، Dalgan، Julius، Jacomo، Jerry، Jerome، Saffar، Hyola401 و Hyola ۴۸۵۱). (حروف متفاوت بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد)

Fig. 6. Mean comparison percentages of oleic fatty acid in studied rapeseed cultivars under the influence of drought stress levels : a1 (full irrigation), a2 (Drought stress after pod setting), and a3 (Drought stress after flowering); and cultivars (b): RGS003, Sarigol, Zafar, Dalgan, Julius, Jacomo, Jerry, Jerome, Saffar, Hyola401, and Hyola4815, respectively (Different letters indicate significant differences at the 5% probability level)

واکنش متفاوتی به تنش خشکی نشان دادند: در شرایط آبیاری کامل، ارقام Jerome و Saffar بیشترین درصد اسید لینولئیک را داشتند. در تنش خشکی مرحله گلدهی، رقم Jerome بیشترین مقدار را به خود اختصاص داد. در تنش خشکی مرحله خورجین‌دهی، رقم Hyola4815 برتر بود. این نتایج نشان می‌دهد که رقم، عامل تعیین‌کننده‌ای در پاسخ ویژگی‌های روغن به شرایط محیطی است (Liersch et al., 2020). ارقام و ژنوتیپ‌های مختلف کلزا، سازوکارهای متفاوتی در برابر تغییرات محیطی از خود بروز می‌دهند که به تغییر در عملکرد و خصوصیات روغن می‌انجامد (Pokharel, 2013).

اسید اولئیک

بر اساس نتایج حاصل از تجزیه واریانس، اثر متقابل تیمار زمان تنش خشکی و رقم بر صفت درصد اسید اولئیک اثر معنی‌داری داشت (شکل ۶). با مقایسه میانگین درصد اسید اولئیک تحت تأثیر زمان تنش خشکی و رقم مشاهده شد که بیشترین درصد اسید اولئیک روغن دانه کلزا با ۶۴ درصد در آبیاری کامل + رقم Zafar به‌دست آمد. پس از این تیمار، ترکیب‌های تیماری آبیاری کامل + رقم Julius و آبیاری کامل + رقم Sarigol بیشترین درصد اسید اولئیک را به خود اختصاص دادند. کمترین میزان درصد اسید اولئیک روغن کلزا با ۵۷ درصد به‌ترتیب در سه تیمار تنش خشکی در مرحله خورجین‌دهی و ارقام Jerry، Jerome و Saffar به‌دست آمد. در هر سه تیمار زمان تنش خشکی، ارقام RGS003، Sarigol، Zafar، Dalgan ، Julius و Jacomo درصد اسید اولئیک بیشتری را در مقایسه با رقم‌های Jerry، Jerome، Saffar، Hyola 401 و Hyola 4815 به خود اختصاص دادند، با

این تفاوت که تنش خشکی در تعدادی از ارقام کاهش بیشتری را در درصد اسید اولئیک باعث شد. رقم Zafar با ۷/۸ درصد بیشترین کاهش را در اثر تنش خشکی در مرحله خورجین‌دهی نشان داد، درحالی‌که رقم Hyola4815 کمترین کاهش را در اثر تنش خشکی در مرحله خورجین‌دهی نشان داد.

در مطالعه‌ای مشابه تأثیر تنش خشکی در مرحله گلدهی کلزا مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که با ایجاد تنش خشکی در هر دو مرحله خورجین‌دهی و گلدهی، درصد اسید اولئیک روغن کلزا کاهش یافت. همچنین اختلاف معنی‌داری بین ارقام از نظر درصد اسید اولئیک در پاسخ به تنش خشکی در مراحل مختلف ثبت شد. سوران و همکاران (Sooran et al., 2020) نیز گزارش نمودند که تنش خشکی و ایجاد کم آبی باعث کاهش معنی‌دار درصد اسید اولئیک در روغن کلزا می‌شود. همچنین طبق گزارش شرفی و همکاران (Sharafi et al,. 2015) تعدادی از ارقام کلزا از نظر خصوصیات روغن مورد بررسی قرار گرفتند و این محققین مشاهده نمودند که ارقام کلزا از نظر درصد اسید اولئیک با یکدیگر اختلاف دارند. این پژوهشگران همچنین، اختلاف میزان فعالیت مسیرهای تولید اسید اولئیک و اختلاف در فعالیت هورمون‌های ارقام مختلف را مهم‌ترین دلیل متفاوت بودن درصد اسید اولئیک در کلزا گزارش نمودند.

اسید اروسیک

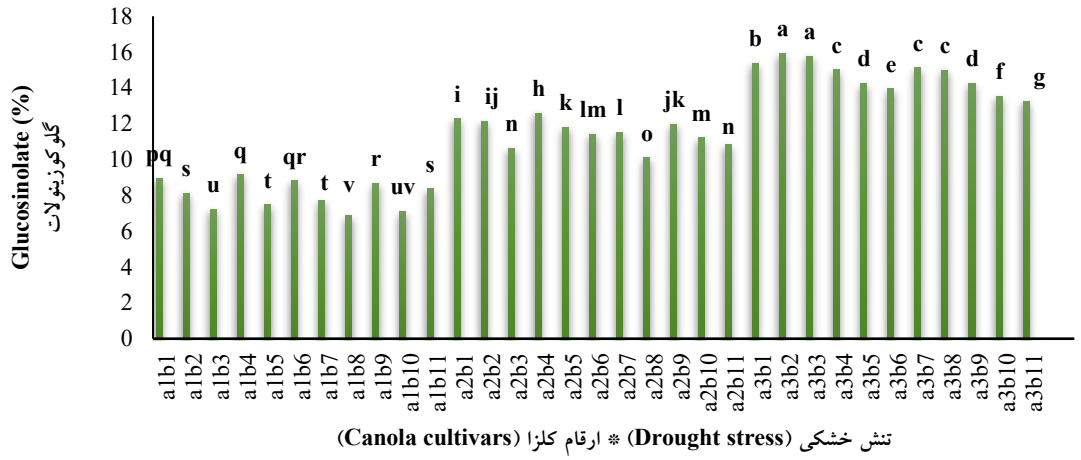
نتایج تجزیه واریانس نشان داد که درصد اسید اروسیک به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر اثر متقابل زمان تنش خشکی و رقم کلزا قرار گرفت. در مطالعه حاضر، در تمامی ارقام مورد بررسی تنش خشکی بر میزان اسید اروسیک کلزا که یک اسید چرب مضر به‌شمار می رود، افزود. رقم‌های Zafar و Jerome بیشترین افزایش میزان اسید اروسیک را با تنش خشکی نشان دادند. در این دو رقم با ایجاد تنش خشکی در مرحله خورجین‌دهی به‌ترتیب به میزان ۱۴۱ و ۱۳۰ درصد به اسید اروسیک روغن کلزا افزوده شد. درحالی‌که در رقم Hyola4815 کمترین میزان کاهش در درصد اسید اروسیک با تنش خشکی به‌دست آمد. لذا تنش خشکی از نظر درصد اسید اروسیک اثر متفاوتی در ارقام مورد مطالعه داشت (Pokhare, 2013).

تنش‌هایی مانند گرما، شوری و خشکی با اعمال تغییرات فیزیولوژیک باعث افزایش میزان تولید اسید اروسیک می‌شوند (Pokharel, 2016). از آنجایی که توانایی ژنوتیپ‌های مختلف گیاهان در مواجهه با تنش‌ها متفاوت است، میزان تولید اسید اروسیک نیز در ارقام کلزا به‌طور متفاوتی تحت تأثیر قرار خواهد گرفت (Mahmood et al., 2019) تأثیر تنش خشکی بر خصوصیات روغن دانه کلزا بررسی شده و مشاهده گردید که محتوای درصد اسید اروسیک با اعمال تنش خشکی کاهش می‌یابد، همچنین اختلاف بالایی بین ارقام مختلف کلزا از نظر میزان اسید اروسیک در پاسخ به سطوح مختلف تنش خشکی مشاهده شد (Kandil et al.,2017).

پژوهش های دیگری نیز تأثیر تنش خشکی را بر خصوصیات روغن کلزا بررسی نموده و مشاهده کرده‌اند که تنش خشکی درصد اسید اروسیک روغن کلزا در ارقام مورد بررسی افزایش داد (Rezaeizad et al., 2019).

گلوکوزینولات

در این مطالعه اثر متقابل تنش خشکی و رقم تأثیر معنی‌داری را بر صفت گلوکوزینولات داشت (شکل ۷). مقایسه میانگین درصد گلوکوزینولات تحت تأثیر بر هم کنش زمان تنش خشکی و رقم نشان داد که تنش خشکی افزایش معنی‌داری را در درصد گلوکوزینولات روغن کلزا سبب شد. در تمامی ارقام کلزا، تنش خشکی تأثیر کاهشی معنی‌داری بر درصد گلوکوزینولات روغن کلزا داشت. در مطالعه‌ای دیگر تأثیر تنش خشکی بر خصوصیات روغن کلزا مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه مشاهده شد که تنش خشکی افزایش معنی‌داری را در درصد گلوکوزینولات در روغن کلزا باعث گردید (Kandil et al., 2017). در پژوهش دیگری نیز نتایج مشابهی گزارش شد (Mahmood et al., 2019). در پژوهش حاضر ارقام از نظر میزان افزایش گلوکوزینولات تحت تأثیر تنش خشکی قرار گرفتند، به‌طوری‌که رقم Zafar



شکل ۷. مقایسه میانگین میزان گلوکوزینولات در ارقام مورد بررسی کلزا تحت تأثیر تیمار زمان تنش خشکی: a1 (آبیاری کامل)، a2 (تنش خشکی پس از خورجین‌دهی)، a3 (تنش پس از گل‌دهی) و b: (ارقام کلزا) به‌ترتیب از (RGS003، Sarigol، Zafar، Dalgan، Julius، Jacomo، Jerry، Jerome، Saffar، Hyola401 و Hyola 4851).

(حروف متفاوت بیانگر اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد است)

Fig. 7. Mean comparison glucosinolate levels in studied rapeseed cultivars under the influence of drought stress levels : a1 (full irrigation), a2 (Drought stress after pod setting), and a3 (Drought stress after flowering); and cultivars (b): RGS003, Sarigol, Zafar, Dalgan, Julius, Jacomo, Jerry, Jerome, Saffar, Hyola401, and Hyola4815, respectively (Different letters indicate significant differences at the 5% probability level)

بیشترین افزایش را در درصد گلوکوزینولات تحت تأثیر تنش خشکی در مرحله خورجین‌دهی نشان داد، درحالی‌که رقم Hyola4815 کمترین نوسان گلوکوزینولات را در اثر اعمال تنش‌های مختلف خشکی نشان داد. تولید اسید اروسیک در گیاهان توسط β– کتواسیل کوآنزیم آ سنتتاز انجام می‌گیرد. نتایج حاصل از مطالعات گوناگون در زمینه آنزیم های مؤثر در این پروسه نشان داده که میزان تولید این آنزیم در ارقام مختلف کلزا متفاوت است. در ارقام کلزا نیز میزان تولید این آنزیم متفاوت بوده و این تفاوت تحت تأثیر تیمارهای تنش خشکی ایجاد می‌شود (Liersch et al., 2020). نتایج حاصل از بررسی‌ها و تحقیقات گوناگونی که روی ارقام مختلف کلزا از نظر خصوصیات روغن صورت گرفته مبین این است که این ارقام از نظر درصد گلوکوزینولات روغن کلزا با یکدیگر تفاوت دارند (Kayaçetin et al., 2018).

نتیجه‌گیری نهایی

نتایج مطالعات و پژوهش‌های انجام گرفته حاکی از آن است که دانه‌های روغنی در مراحل مختلف رشد از جمله مرحله جوانه‌زنی، رویشی، گلدهی و پر شدن دانه به تنش خشکی حساس است و تنش بر خصوصیات مورفولوژیک و فیزولوژیک تأثیر گذاشته و عملکرد روغن را به‌طور معنی‌داری کاهش می‌دهد. اما میزان این کاهش در ارقام گوناگون متفاوت است. به‌طوری‌که در برخی ارقام تأثیر تنش در عملکرد روغن کمتر و در ارقام دیگر بیشتر می‌باشد. همچنین سطوح مختلف تنش خشکی در ارقام مورد مطالعه اثر معنی‌داری در اسیدهای چرب کلزا داشت و سبب کاهش عملکرد روغن در ارقام گردید. تنش خشکی و ایجاد کم آبی در مراحل گل‌دهی و پر شدن دانه کاهش معنی‌داری را بر عملکرد روغن ارقام سبب شد. به‌طور کلی ارقامی که بیشترین تحمل را در برابر تنش آبیاری پس از گلدهی نشان دادند برای ما حائز اهمیت هستند چرا که این ارقام می‌توانند دوره

رشدی خود را بهتر و زودتر از سایر ارقام طی نمایند و در واقع تا حدی از تاثیر مضر تنش در امان بمانند، مانند رقم Saffar در این تحقیق یا ارقام زودرس مشابه، بنابراین کشت ارقام متوسط و زودرس در مناطقی که تنش خشکی یا تنش دمایی آخر فصل دارند، می‌تواند عملکرد قابل قبولی برای تولیدکنندگان کلزا داشته باشد در نهایت در بین ارقام مورد بررسی، ارقام Dalgan و RGS003 تحمل بیشتری نسبت به کم آبی پس از گلدهی و خورجین‌دهی داشتند، پس می‌توان با انتخاب توصیه و معرفی ژنوتیپ‌های متحمل به تنش برای کشاورزان و تولیدکنندگان از تاثیر سوء کم آبی کاست و به پایداری تولید دانه دست یافت.

تشکر و سپاسگزاری

برخود لازم می‌دانم از همکاران محترم مؤسسه تحقیقات، اصلاح و تهیه نهال و بذر و همچنین بخش تحقیقات دانه‌های روغنی مؤسسه به‌خصوص استاد گرانقدر جناب آقای دکتر شیرانی که در تمامی مراحل این پروژه زحمات ارزشمند و همکاری خوبی در اجرای این طرح تحقیقاتی داشتند تشکر و قدردانی نمایم.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ‌گونه تضاد منافعی با شـخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

منابع مورد استفاده

References

1. Anonymous, 2020. IRAN Country Partnership Strategy. Eco. Trade and Development Bank.
2. Asaduzzaman, M., Pratley, J.E., An, M., Luckett, D.J., Lemerle, D., 2014. Canola interference for weed control. Springer Sci. Rev. 2, 63–74. https://doi.org/10.1007/s40362-014-0022-2.
3. Badings, H.T., De Jong, C., 1983. Glass capillary gas chromatography of fatty acid methyl esters. A study of conditions for the quantitative analysis of short- and long-chain fatty acids in lipids. J. Chromatogr. A 279, 493–506. https://doi.org/10.1016/s0021-9673(01)93650-7
4. Carlsson, A.S., 2009. Plant oils as feedstock alternatives to petroleum – a short survey of potential oil crop platforms. Biochimie 91, 665–670. https://doi.org/10.1016/j.biochi.2009.03.021
5. Channaoui, S., El Kahkahi, R., Charafi, J., Mazouz, H., El Fechtali, M., Nabloussi, A., 2017. Germination and seedling growth of a set of rapeseed (*Brassica napus*) varieties under drought stress conditions. Int. J. Environ. Agric. Biotechnol. 2, 42–48. https://doi.org/10.22161/ijeab/2.1.61
6. Elferjani, R., Soolanayakanahally, R., 2018. Canola responses to drought, heat, and combined stress: shared and specific effects on carbon assimilation, seed yield, and oil composition. Front. Plant Sci. 9, 1224. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01224
7. Eyni Nargeseh, H., Aghaalikhani, M., Shirani Rad, A.H., Mokhtassi-Bidgoli, A., Modarres Sanavy, S.A.M., 2020. Comparison of 17 rapeseed cultivars under terminal water deficit conditions using drought tolerance indices. J. Agric. Sci. Technol. 22(2), 489–503.
8. Fathi, A., Barari Tari, D., 2016. Effect of drought stress and its mechanism in plants. Int. J. Life Sci. 10(1), 1–6.
9. Fetzer, A., Hintermayr, C., Schmid, M., Stäbler, A., Eisner, P., 2021. Effect of acylation of rapeseed proteins with lauroyl and oleoyl chloride on solubility and film-forming properties. Waste Biomass Valor. 12, 745–755. https://doi.org/10.1007/s12649-020-01012-6
10. Fischer, A.A., Maurer, R., 1978. Drought resistance in spring wheat cultivars: I. Grain yield responses. Aust. J. Agric. Res. 29, 894–912. https://doi.org/ 10.1071/AR9780897
11. Kandil, A.A., Sharief, A.E., El-Mohandes, S.I., Keshta, M.M., 2017. Performance of canola (*Brassica napus* L.) genotypes under drought stress. Int. J. Environ. Agric. Biotechnol. 2, 653–657. https://doi.org/ 10.22161/ijeab/2.2.12
12. Kayaçetin, F., Efeoğlu, B., Sarıoğlu, G., 2018. Evaluation of fatty acid compositions of some important wild and domestic Turkish mustard genotypes (*Brassica* spp.). Int. J. Second. Metabol. 5, 270–278. 10.3390/agriculture10120607. https://doi.org/ 10.21448/ijsm.474894
13. Liersch, A., Bocianowski, J., Nowosad, K., Mikołajczyk, K., Spasibionek, S., Wielebski, F., Matuszczak, M., Szała, L., Cegielska-Taras, T., Sosnowska, K., Bartkowiak-Broda, I., 2020. Effect of genotype × environment interaction for seed traits in winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). Agriculture 10, 607–614. 10.3390/agriculture10120607. https://doi.org/ 10.3390/agriculture10120607
14. Mahmood, T., Mustafa, H.S.B., Aftab, M., Ali, Q., Malik, A., 2019. Super canola: newly developed high yielding, lodging and drought tolerant double zero cultivar of rapeseed (*Brassica napus* L.). Genet. Mol. Res. 18(2), 56–63. https://doi.org/ 10.4238/gmr16039951
15. Mesjedi, A., Shokouhfar, A., Alavifazel, M., 2008. Determination of the most suitable irrigation interval for summer

نسخه پیش از انتشار

maize (SC.704 hybrid) and investigation of drought stress effect on yield using class A evaporation pan data. J. Agric. Sci. Nat. Resour. 12(46), 543–551. (In Persian with English abstract).
16. Pirnajmedin, F., Jaškūnė, K., Majidi, M.M., 2024. Adaptive strategies to drought stress in grasses of the Poaceae family under climate change: physiological, genetic and molecular perspectives: a review. Plant Physiol. Biochem. 108814. https://doi.org/ 10.1016/j.plaphy.2024.108814
17. Pokharel, M., 2013. Physiological characterization of winter canola under heat and drought stress during flowering and pod-filling stages. PhD Thesis, Kansas State University, USA.
18. Popescu, A., Stoian, E., Șerban, V., 2019. Oil seeds crops cultivated area and production in the EU-28 – trends and correlations, 2008–2018. Sci. Pap. Ser. Mgmt., Econ. Eng. Agric. Rural Dev. 19, 63–73.
19. Raza, M.A.S., Shahid, A.M., Saleem, M.F., Khan, I.H., Ahmad, S., Ali, M., Iqbal, R., 2017. Effects and management strategies to mitigate drought stress in oilseed rape (*Brassica napus* L.): a review. Zemdirbyste-Agric. 104(1), 85–94.
20. Rezaeizad, M., Sayfzadeh, S., Shirani Rad, A.H., Ali, S., Valadabadi, S.A., Hadidi Masouleh, E., 2019. Influence of drought stress and chitosan on fatty acid compounds of rapeseed varieties. Iran. J. Plant Physiol. 9(3), 2819–2825. https://doi.org/ 10.30495/ijpp.2019.667143 (In Persian with English abstract)
21. Saurabh, T., Patnaik, M., Bhagt, S.L., Renge, V.C., 2011. Epoxidation of vegetable oils: a review. Int. J. Adv. Eng. Technol. 6, 56–67.
22. Saxton, K.E., Rawls, W.J., 2006. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. Soil Sci. Soc. Am. J. 70(5), 1569–1578.
23. Sharafi, Y., Majidi, M.M., Jafarzadeh, M., Mirlohi, A., 2015. Multivariate analysis of genetic variation in winter rapeseed (*Brassica napus* L.) cultivars. J. Agric. Sci. Technol. 17, 1319–1331.
24. Sher, A., Hassan, F., Ali, H., Ijaz, M., Sattar, A., Yasir, T.A., Ul-Allah, S., Qayyum, A., 2017. Climatic variation effects on canola (*Brassica napus*) genotypes. Pak. J. Bot. 49(SI), 111–117.
25. Siger, A., Gawrysiak-Witulska, M., Bartkowiak-Broda, I., 2017. Antioxidant (tocopherol and canolol) content in rapeseed oil obtained from roasted yellow-seeded *Brassica napus*. J. Am. Oil Chem. Soc. 94, 37–46. https://doi.org/ 10.1007/s11746-016-2921-7
26. Sooran, S.A., Amirshekari, H., Shirani Rad, A.H., Mozaffari, J., Fotokian, M.H., 2020. Influence of drought stress and application of ammonium sulfate on quality of rapeseed oil. Agric. Nat. Resour. 54(2), 105v112. https://doi.org/ 10.34044/j.anres.2020.54.1.15 (In Persian with English abstract)
27. 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(6), 1873–1880.
28. Varényiová, M., Ducsay, L., Ryant, P., 2017. Sulphur nutrition and its effect on yield and oil content of oilseed rape (*Brassica napus* L.). Acta Univ. Agric. Silvic. Mendel. Brun. 65, 57–64. https://doi.org/ 10.11118/actaun201765020555
29. Zarei, G., Shamsi, H., Mohammad Dehghani, S., 2010. The effect of drought stress on yield, yield components and seed oil content of three autumnal rapeseed cultivars (*Brassica napus* L.). J. Res. Agric. Sci. 6, 29–37.
30. Zebarjadi, A., Kakaei, M., Mostafaie, A., 2011. Genetic variability of some traits in rapeseed (*Brassica napus* L.) under drought stress and non-stress conditions. Biharean Biol. 5(2), 127–131.

نسخه پیش از ویرایش و اصلاح نشده