J. Soil Plant Interact. 2026; 17(3): 33–54. https://doi.org/10.47176/jspi.17.3.22011

Journal of Soil and Plant Interactions

Journal homepage: https://jspi.iut.ac.ir/

ISSN: 2783-5014 EISSN: 2783-5286

Research Article

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 (UMA), Ardabil, Iran

* Corresponding author, Email: saber.seifamiri@gmail.com

(Received: 10 May 2026; Revised: 1 June 2026; Accepted: 8 June 2026)

Abstract

Background and Objective: Drought stress is the most important limiting factor for rapeseed yield in dryland areas, and selecting tolerant genotypes based on physiological indices is an effective solution to mitigate yield losses. This study aimed to evaluate qualitative and biochemical indices as biomarkers of tolerance and identify drought-tolerant rapeseed genotypes.

Methods: The experiment was conducted as a split plot in a randomized complete blocks 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 rapeseed genotypes. The measured traits included oil yield, fatty acids 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-pod setting stress) and Saffar (under post-flowering stress) genotypes were identified as drought-tolerant genotypes due to their greater stability in maintaining oil yield and limited changes in fatty acids profiles. In contrast, Zafar genotype 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 genotypes, despite being more sensitive to drought stress, also produced the highest oil yield under full irrigation conditions.

Conclusion: Drought tolerance in rapeseed 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 drought stress, while the Julius and RGS003 genotypes are good choices for fully irrigated conditions. Therefore, selecting the right genotype for water-deficit areas requires simultaneous consideration of "physiological tolerance" and "yield potential."

Keywords: Water deficit, Oilseed, Fatty acids, Genotype, Oil yield.

How to Cite: Seifamiri, S., Seifamiri, M., 2026. The effect of drought stress on some qualitative and biochemical indices of rapeseed (*Brassica napus* L.) genotypes. J. Soil Plant Interact. 17(3), 33–54 (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.47176/jspi.17.3.22011

Copyright © 2026 Isfahan University of Technology, Published by IUT Press. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

روابط خاک و گیاه ۱۴۰۵؛ ۱۷(۳): ۵۴-۳۳، https://doi.org/10.47176/jspi.17.3.22011

روابط خاک و گیاه

صفحه خانگی فصلنامه: https://jspi.iut.ac.ir/

شاپا: ۲۷۸۳-۵۰۱۴ شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۵۲۸۶

مقاله پژوهشی

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

صابر سیف امیری[۱*] و محمد سیف امیری[۲]

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

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

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

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۲/۲۰؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۳/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۳/۱۸)

چکیده

پیشینه پژوهش و هدف: تنش خشکی مهم‌ترین عامل محدودکننده عملکرد کلزا در مناطق دیم است و انتخاب ژنوتیپ‌های 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 کرت‌های خردشده 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، ژنوتیپ‌های 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، ژنوتیپ Zafar با افزایش ۱۴۸/۷ درصدی اسید اروسیک و کاهش ۳۲/۶ درصدی اسید پالمیتیک، حساس‌ترین واکنش بیوشیمیایی را نشان داد. ژنوتیپ‌های Julius و RGS003 نیز با وجود حساسیت بیشتر به تنش خشکی، در شرایط آبیاری کامل بیشترین عملکرد روغن را داشتند.

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

واژه‌های کلیدی: کم‌آبی، دانه روغنی، اسیدهای چرب، ژنوتیپ، عملکرد روغن.

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. ۱۴۰۵ ©.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است:

Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

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 به‌دلیل محدودیت زمین‌های قابل استفاده عملاً امکان‌پذیر نیست، تمرکز اصلی بر افزایش عملکرد در واحد سطح و بهبود بهره‌وری محصولات راهبردی 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 به‌دلیل 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 اسیدهای پالمیتیک، اولئیک، لینولئیک، لینولنیک و اروسیک است. ژنوتیپ‌های جدید و تراریخته کلزا با دارا بودن اسید اروسیک کم (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، مقدار کم این اسید چرب اشباع‌نشده نامطلوب (اسید اروسیک) است (Channaoui et al., 2017). علاوه بر کیفیت روغن، پروتئین دانه کلزا نیز از ارزش تغذیه‌ای زیادی برخوردار بوده و دارای مقادیر قابل توجهی از اسیدهای آمینه ضروری است (Fischer et al., 1978). این ویژگی‌های منحصربه‌فرد، کلزا را به یک محصول راهبردی در تأمین امنیت غذایی تبدیل کرده است.

با این وجود، گیاهان همواره در معرض عوامل تنش‌زای غیرزیستی (مانند خشکی، شوری و دمای زیاد) و زیستی (مانند 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. پروفسور مسعود هاشمی، استاد علوم خاک و فیزیولوژی گیاهان در دانشگاه ماساچوست آمهرست، در توصیف جایگاه محوری این تنش، اصطلاح «ام‌التنش» (مادر تنش‌ها) را به‌کار می‌بردند (Prof. Masoud Hashemi, personal communication). این تعبیر نشان‌دهنده نقش تنش خشکی در تشدید آثار سایر تنش‌های محیطی و کاهش عملکرد گیاهان زراعی است.

تغییرات اقلیمی دهه‌های اخیر، فراوانی و شدت این تنش را افزایش داده و خسارت‌های ناشی از آن را تشدید کرده است. هنگامی که گیاهان در معرض کمبود آب قرار می‌گیرند، مجموعه‌ای از تغییرات فیزیولوژیک، بیوشیمیایی و مولکولی در آن‌ها رخ می‌دهد که در نهایت منجر به کاهش عملکرد نهایی محصول می‌شود (Pirnajmedin et al., 2024). بنابراین، بررسی تحمل نسبی به کمبود آب در گیاهان زراعی، از جمله کلزا، گامی ضروری به‌منظور اصلاح ژنوتیپ‌ها 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 نمونه، 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

جدول ۱. مشخصه‌های ژنوتیپ‌های کلزای مورد بررسی، شامل نام ژنوتیپ، دوره رشد و منشأ

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

ژنوتیپ (Genotype)	مبدا (Origin)	دوره رشد (Growth period)
RGS003	آلمان Germany	219–224
Sarigol	آلمان Germany	219–229
Zafar	ایران Iran	220–225
Dalgan	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

افزایش تحمل گیاه به کم‌آبی کمک می‌کند (Fathi and Barari Tari, 2016).

اگرچه تأثیر خشکی بر عملکرد دانه کلزا در پژوهش‌های 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 خشکی را به‌صورت کلی و بدون در نظر گرفتن زمان دقیق وقوع آن در مراحل حساس زایشی (مانند گل‌دهی در برابر 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 ژنوتیپ‌های مختلف می‌تواند کاملاً متفاوت باشد. این شکاف دانسته‌ها، به‌ویژه در مورد ژنوتیپ‌های 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 زیاد (به‌ویژه در سایه تغییرات اقلیمی و کاهش بارش‌های جوی)، ارزیابی صفات مرتبط با تحمل 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 انجام شد تا ضمن شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل، درک بهتری از سازوکارهای فیزیولوژیک تحمل 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 کرت‌های خردشده در

جدول ۲. آمار هواشناسی ماهانه (دما و بارندگی) طی سال‌های اجرای آزمایش

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

2019–2020		2018–2019			
بارندگی Precipitation (mm)	میانگین دما Average temperature (°C)	بارندگی Precipitation (mm)	میانگین دما Average temperature (°C)		
27.5	22.5	20.5	18.5	مهر	September–October
37.0	16.0	34.5	17.5	آبان	October–November
40.0	16.5	39.5	15.2	آذر	November–December
27.6	15.0	24.2	13.8	دی	December–January
33.8	7.5	32.2	8.0	بهمن	January–February
55.2	20.0	65.5	18.0	اسفند	February–March
40.5	25.8	4.5	22.5	فروردین	March–April
35.2	27.0	31.5	26.5	اردیبهشت	April–May
8.0	35.5	10.2	32.2	خرداد	May–June

جدول ۳. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه مورد آزمایش

Table 2. Physical and chemical properties of the tested farm soil

رسانایی الکتریکی Electrical conductivity (EC_e)	کربن آلی Organic carbon (OC)	رس Clay	سیلت Silt	شن Sand	بافت Texture	لایه Layer
$dS\ m^{-1}$	----------%----------					cm
0.98	1.07	61	29	10	رسی Clay	0–27
0.37	1.38	63	27	10	رسی Clay	27–70

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 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، Hyola 401 و Hyola 4815) بودند.

منطقه مورد بررسی دارای اقلیم نیمه‌خشک با تابستان‌های گرم و زمستان‌های نسبتاً سرد است. 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 ۲)، بیشینه دمای مطلق در مکان آزمایش ۴۲ درجه سلسیوس و کمینه آن ۱۶- درجه سلسیوس بوده و میزان بارندگی سالانه در دامنه ۹/۷۲ تا ۳۲۳ میلی‌متر متغیر است.

پیش از کاشت، نمونه‌برداری مرکب خاک از دو لایه ۰ تا ۲۷ و ۲۷ تا ۷۰ سانتی‌متری انجام شد. بافت خاک به روش هیدرومتر بویکوس (Bouyoucos, 1962)، واکنش (pH) و رسانایی الکتریکی (EC) در عصاره اشباع خاک (Thomas, 1996; Rhoades, 1996)، کربن آلی به روش اکسایش تر (Walkley and Black, 1934)، نیتروژن کل به روش میکروکجلدال

جدول ۴. نتایج تجزیه خاک مزرعه طی دو سال زراعی

Table 3. Analysis results of the farm soil over two crop years

فسفر (P) (mg kg^{-1})	پتاسیم (K) (mg kg^{-1})	نیتروژن (N) (٪)	pH	سال Year
8.6	420	0.077	7.5	(2018)
8.15	387	0.067	7.6	(2019)

(Bremner, 1965)، فسفر قابل جذب به روش اولسن (Olsen et al., 1954) و پتاسیم قابل جذب با استفاده از فلیم فوتومتر (Hanway and Heidel, 1952) اندازه‌گیری شدند.

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه مکان آزمایش در جداول ۳ و ۴ ارائه شده است. خاک منطقه عموماً حاصلخیز و غنی از ماده آلی است (جدول ۲). گنجایش نگهداری آب خاک با استفاده از مدل SPAW (Saxton and Rawls, 2006) تخمین زده شد که بر این اساس، گنجایش مزرعه‌ای (FC) و نقطه پژمردگی دائم (PWP) به‌ترتیب ۴۳ و ۲۶ درصد حجمی برآورد گردید و آب قابل دسترس گیاه (PAW) برابر ۱۷ درصد حجمی محاسبه شد.

روش اجرای طرح آزمایشی 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 خردشدن کلوخه‌ها و نرم‌شدن بستر خاک، عملیات دیسک و ماله انجام گرفت. پیش از کاشت، از خاک مزرعه در دو لایه ۲۷–۰ و ۷۰–۲۷ سانتی‌متری نمونه‌برداری انجام شد. میزان و حجم آب مصرفی در هر کرت آزمایشی با روش آبیاری سطحی و با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد. مدیریت آبیاری بر پایه پایش مستقیم رطوبت خاک انجام شد. بدین‌منظور، پیش از هر نوبت آبیاری، رطوبت وزنی خاک در لایه توسعه ریشه (لایه ۶۰–۰ سانتی‌متر) اندازه‌گیری شده و عمق آب مورد نیاز برای رساندن رطوبت خاک به حد گنجایش مزرعه‌ای (FC) محاسبه شد. با توجه به بافت رسی خاک منطقه، درصد تخلیه مجاز (MAD) در دامنه ۵۰ تا ۶۰ درصد آب قابل دسترس (PAW) در نظر گرفته شد (Allen et al., 1998; Mesjedi et al., 2008):

$$V = I \times A \times 1000 \quad (۱)$$

که در آن، V حجم آب آبیاری در هر کرت (لیتر)، I، ارتفاع آب آبیاری (متر) و A مساحت هر کرت (مترمربع) است (Mesjedi et al., 2008). 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 خورجین‌دهی، ۲ دور آبیاری انجام شد. جزئیات حجم آب کاربردی برای هر تیمار در دو سال آزمایش، در بخش نتایج ارائه شده است.

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) پیش از آخرین دیسک‌زنی در سطح مزرعه پاشیده شد. هم‌زمان، علف‌کش ترفلان به میزان ۵/۲ لیتر در هکتار به‌طور یکنواخت پخش شده 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 شده 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 سلسیوس 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 مخلوط 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 (دارای دی‌اتیل‌اتر و روغن) جمع‌آوری شده و به لوله آزمایش از پیش وزن‌شده منتقل شد. حلال در آون با دمای ۳۰ درجه سلسیوس تبخیر شده و وزن روغن از تفاوت 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 شد.

شاخص‌های تحمل و حساسیت به خشکی بر مبنای عملکرد دانه

به‌منظور شناسایی دقیق‌تر ژنوتیپ‌های متحمل، شاخص‌های تحمل و حساسیت به خشکی شامل شاخص تحمل تنش (STI)، شاخص پایداری عملکرد (YSI)، شاخص حساسیت به خشکی (SSI)، میانگین هندسی بهره‌وری (GMP)، میانگین بهره‌وری (MP)، شاخص تحمل (TOL) و میانگین هارمونیک عملکرد (HM) بر مبنای عملکرد دانه ژنوتیپ‌ها در شرایط بدون تنش (Yp) و تحت تنش (Ys) با روابط (۲) تا (۸) محاسبه شدند. در این روابط، Yp و Ys به‌ترتیب بیانگر عملکرد دانه هر ژنوتیپ در شرایط بدون تنش (آبیاری کامل) و شرایط تنش خشکی (بر حسب کیلوگرم در هکتار) می‌باشند. همچنین $\bar{Y}p$ و $\bar{Y}s$ به‌ترتیب نشان‌دهنده مقادیر میانگین عملکرد تمامی ژنوتیپ‌ها در شرایط بدون تنش و تنش خشکی (بر حسب کیلوگرم در هکتار) هستند. روابط مربوطه به‌صورت زیر محاسبه شدند:

شاخص تحمل تنش (STI): این شاخص بدون واحد بوده و دامنه آن بین صفر و یک است (Fernandez, 1992):

$$STI = (Yp \times Ys)/(\bar{Y}p)^2 \quad (۲)$$

شاخص پایداری عملکرد (YSI): این شاخص بدون واحد بوده و دامنه آن بین صفر و یک است (Bouslama and Schapaugh, 1984):

$$YSI = Ys/Yp \quad (۳)$$

شاخص حساسیت به خشکی (SSI): این شاخص بدون واحد بوده و مقادیر کمتر از یک نشان‌دهنده تحمل بیشتر به تنش است (Fischer and Maurer, 1978):

$$SSI = [1 - (Ys/Yp)]/[1 - (\bar{Y}s/\bar{Y}p] \quad (۴)$$

میانگین هندسی بهره‌وری (GMP): این شاخص بر حسب کیلوگرم در هکتار است (Fernandez, 1992):

$$GMP = \sqrt{(Yp \times Ys)} \quad (۵)$$

میانگین بهره‌وری (MP): این شاخص بر حسب کیلوگرم در هکتار است (Rosielle and Hamblin, 1981):

$$MP = (Yp + Ys)/2 \quad (۶)$$

شاخص تحمل (TOL): این شاخص بر حسب کیلوگرم در هکتار بوده و مقادیر کمتر آن نشان‌دهنده تحمل بیشتر به تنش است (Rosielle and Hamblin, 1981):

$$TOL = Yp - Ys \quad (۷)$$

میانگین هارمونیک عملکرد (HM): این شاخص بر حسب کیلوگرم در هکتار است (Fernandez, 1992):

$$HM = 2(Yp \times Ys) / (Yp + Ys) \quad (۸)$$

تعیین 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 بر اساس روش Badings and De Jong (1983) آماده‌سازی شدند. مخلوط حاصل در دمای اتاق به مدت یک دقیقه به‌شدت هم زده شد و سپس در ۱۵۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ گردید. لایه رویی با میکروسرنگ تمیز جدا شده و پس از عبور از صافی ۲۲/۰ میکرونی به میکروتیوب منتقل شد. محلول صاف‌شده به دستگاه GC تزریق شده و شناسایی اسیدهای چرب بر اساس روش نرمالیزاسیون و استاندارد بیرونی صورت گرفت.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

پیش از تجزیه واریانس، نرمال‌بودن 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. تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) به‌منظور کاهش ابعاد داده‌ها و شناسایی الگوهای پنهان در روابط بین صفات، با استفاده از نرم‌افزار SPSS (نسخه ۲۲) انجام شد. پیش از انجام این تحلیل، آزمون KMO و آزمون کرویت بارتلت برای بررسی کفایت نمونه‌گیری و معناداری ماتریس همبستگی انجام گرفت.

مدل آماری این پژوهش به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی و در دو سال اجرا گردید. در این مدل، سال (Y)، تنش خشکی (A) و اثر برهمکنش آن‌ها (A×Y) به‌عنوان عوامل اصلی با استفاده از خطای آزمایشی اول (با ۸ درجه آزادی، حاصل اثر برهمکنش تکرار × سال × A) آزمون شدند. فاکتور فرعی شامل ۱۱ ژنوتیپ (B) بود و آثار مربوط به آن (B, B×Y, B×A, B×A×Y) با استفاده از خطای آزمایشی دوم (با ۱۲۰ درجه آزادی، حاصل تجمیع آثار برهمکنش 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 خشکی نسبت به شاهد گردید، به‌طوری‌که شدیدترین محدودیت آبی در تیمار قطع آبیاری از مرحله خورجین‌دهی رخ داد.

ارتباط پروفیل اسیدهای چرب و گلوکوزینولات‌ها با سازوکارهای تحمل خشکی

نکته کلیدی در این پژوهش، تبیین ارتباط بین تغییرات پروفیل اسیدهای چرب و گلوکوزینولات‌ها با سازوکارهای تحمل خشکی است. اگرچه این صفات عمدتاً به‌عنوان شاخص‌های کیفی روغن شناخته می‌شوند، اما تغییرات مشخص آن‌ها تحت تنش خشکی، دانسته‌های ارزشمندی از راهبرد سازگاری 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 ژنوتیپ‌ها (مانند Zafar) نه‌تنها یک کاهش کیفی، بلکه نشانه‌ای از نبود تعادل متابولیک و حساسیت فیزیولوژیک به خشکی تلقی می‌شود. در مقابل، ژنوتیپ‌هایی که پایداری بیشتری در حفظ پروفیل اسیدهای چرب خود داشتند (مانند Jerome)، احتمالاً از سازوکارهای 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

جدول ۵. شاخص‌های تحمل خشکی در شرایط تنش آبی پس از گل‌دهی برای ژنوتیپ‌های مورد آزمایش

Table 5. Drought tolerance indices under post-anthesis water stress for the tested rapeseed genotypes

STI (-)	GMP (kg ha^{-1})	SSI (-)	MP (kg ha^{-1})	TOL (kg ha^{-1})	Ys (kg ha^{-1})	Yp (kg ha^{-1})	ژنوتیپ Genotype
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
0.40	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

Yp: عملکرد در شرایط بدون تنش، Ys: عملکرد در شرایط تنش، TOL: شاخص تحمل تنش، MP: میانگین بهره‌وری، SSI: شاخص حساسیت به تنش، GMP: میانگین هندسی بهره‌وری، STI: شاخص تحمل به تنش.

Yp: Yield under non-stress conditions, Ys: Yield under stress conditions, TOL: Stress tolerance index, MP: Mean productivity, SSI: Stress susceptibility index, GMP: Geometric mean productivity, STI: Stress tolerance index.

دارند. افزایش کنترل‌شده این ترکیبات می‌تواند بخشی از پاسخ تطبیقی گیاه برای مقابله با خسارت اکسیداتیو ناشی از خشکی باشد. بنابراین، 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.

در بین ژنوتیپ‌های مورد بررسی، ژنوتیپ Dalgan بیشترین عملکرد را در شرایط بدون تنش (Yp) و نیز بیشترین مقادیر شاخص‌های GMP، MP، TOL و STI را به خود اختصاص داد (جدول ۵). این ژنوتیپ پس از Sarigol، بیشترین شاخص SSI را نیز نشان داد. ژنوتیپ Saffar نیز بیشترین عملکرد دانه در شرایط تنش خشکی (Ys) و بیشترین شاخص HM را به خود اختصاص داد. شایان ذکر است که ژنوتیپ RGS003 نیز از نظر عملکرد دانه در هر دو شرایط تنش خشکی و بدون تنش و شاخص‌های GMP، MP، TOL و STI در جایگاه بالایی قرار داشت. بر اساس این نتایج، ژنوتیپ‌های Dalgan و RGS003 بیشترین مقاومت به تنش خشکی پس از مرحله گل‌دهی را نشان دادند.

شاخص‌های تحمل با عملکرد دانه، Yp و 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 نشد. همچنین، Ys با شاخص TOL همبستگی معنی‌داری نداشت (جدول ۶). شاخص‌های مقاومت به خشکی، توانایی ژنوتیپ‌ها را در حفظ عملکرد تحت شرایط تنش نشان می‌دهند؛ بنابراین، مقادیر بزرگ این شاخص‌ها می‌تواند بیانگر پتانسیل زیاد عملکرد ژنوتیپ در هر دو شرایط تنش و بدون تنش باشد (Reza et al., 2017). در همین راستا، Eyni Nargeseh et al. (2020) نیز همبستگی مثبت و معنی‌داری بین عملکرد دانه کلزا و شاخص‌های مقاومت به خشکی گزارش نمودند.

1- Biomarker

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

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

	Yp	Ys	GMP	HM	MP	TOL	STI	SSI
Yp	1							
Ys	0.406	1						
GMP	0.811**	0.863**	1					
HM	0.579	0.979**	0.946**	1				
MP	0.877**	0.782**	0.989**	0.890**	1			
TOL	0.718*	–0.345	0.175	–0.152	0.315	1		
STI	0.815**	0.858**	0.999**	0.944**	0.99**	0.183	1	
SSI	0.322	–0.73*	–0.291	–0.583	–0.150	0.887**	–0.284	1

* و ** به مفهوم همبستگی معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد است. Yp: عملکرد در شرایط بدون تنش، Ys: عملکرد در شرایط تنش، TOL: شاخص تحمل تنش، MP: میانگین بهره‌وری، SSI: شاخص حساسیت به تنش، GMP: میانگین هندسی بهره‌وری، HM: میانگین هارمونیک عملکرد، STI: شاخص تحمل به تنش.

* and ** stand for significant correlation at 5 and 1 percent probability levels. Yp: Yield under non-stress conditions, Ys: Yield under stress conditions, TOL: Stress tolerance index, MP: Mean productivity, SSI: Stress susceptibility index, GMP: Geometric mean productivity, HM: Harmonic mean of yield, STI: Stress tolerance index.

گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها بر اساس شاخص‌های تحمل خشکی

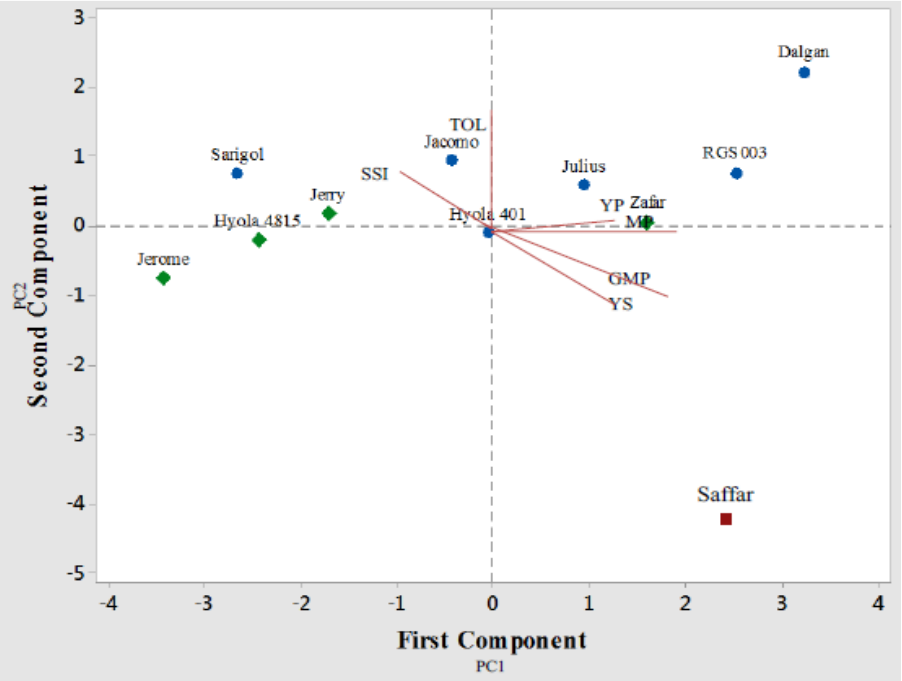
بر اساس نتایج حاصل از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) و نمودار بای‌پلات در شرایط نرمال و تنش پس از مرحله گل‌دهی، ژنوتیپ‌ها به سه گروه تفکیک شدند (شکل ۱). در گروه اول ژنوتیپ‌های RGS003، Sarigol، Dalgan، Julius، Jacomo و Hyola 401، در گروه دوم ژنوتیپ Saffar و در گروه سوم ژنوتیپ‌های Zafar، Jerry، Jerome و Hyola 4815 قرار گرفتند. گروه اول دارای بیشترین مقادیر Yp، TOL و SSI بود. گروه دوم نیز دارای بیشترین مقادیر Ys، GMP، HM، MP و STI بود. حساس‌ترین ژنوتیپ‌ها به خشکی با کمترین مقادیر شاخص‌های مقاومت در گروه سوم قرار گرفتند. با توجه به این نتایج، شاخص‌های مقاومت به تنش می‌توانند برای گزینش ژنوتیپ‌های با میزان عملکرد بیشتر در شرایط تنش مورد استفاده قرار گیرند (Peleg et al., 2011).

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 در صفات زراعی و فنولوژیک ایجاد نمود. ژنوتیپ‌های مختلف نیز از نظر میزان اسیدهای چرب اشباع و غیراشباع با یکدیگر تفاوت معنی‌داری داشتند. اثر برهمکنش تنش خشکی و ژنوتیپ بر میزان اسیدهای چرب اشباع و غیراشباع در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۷).

واکنش متفاوت ژنوتیپ‌ها به تنش خشکی

به عبارت دیگر، ژنوتیپ‌های مختلف کلزا واکنش‌های متفاوتی به تنش خشکی نشان دادند. برخی ژنوتیپ‌ها تحت تنش، تغییرات محدودتری در ترکیب اسیدهای چرب داشتند که می‌تواند نشان‌دهنده تحمل بیشتر باشد. این اثر برهمکنش مؤکداً نشان می‌دهد که انتخاب ژنوتیپ‌های 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 محدودشدن انتقال متابولیت‌ها به دانه همراه بود. این تغییرات می‌تواند عامل اصلی کاهش ساخت اسیدهای چرب اشباع‌شده باشد، چراکه تنش



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

Fig. 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

جدول ۷. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) ترکیب اسیدهای چرب

Table 7. Analysis of variance (mean squares) for fatty acids composition

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

ns، * و ** به‌ترتیب اثر غیرمعنی‌دار، و آثار معنی‌دار در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد را نشان می‌دهند.

ns, * and ** indicate non-significant effect, and significant effects at 5 and 1 percent probability levels, respectively.

جدول ۸. تجزیه واریانس مرکب برخی صفات مورد ارزیابی

Table 8. Composite analysis of variance of some evaluated traits

منابع تغییر Sources of variation	درجه آزادی df	میانگین مربعات (Mean squares)	
		درصد روغن Oil percentage	عملکرد روغن Oil yield
سال (Y)	1	0.102ns	13398.94ns
تکرار (Replication)	4	71.421*	146182.2*
تیمار تنش خشکی (A) Drought stress treatment	2	0.61*	5216706.9*
Y×A	2	0.086ns	33580.23ns
خطای a (Error a)	8	0.081	34220.63
ژنوتیپ (B) (Genotype, B)	10	11.473**	165838.812*
Y×B	10	0.022ns	17956.06ns
A×B	20	0.093ns	37888.25*
Y×A×B	20	0.027ns	23940.33ns
خطای b (Error b)	120	0.085	18890.35
ضریب تغییرات (٪)(Coefficient of variation)		0.70	14.18

ns، * و ** به‌ترتیب اثر غیرمعنی‌دار، و آثار معنی‌دار در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد را نشان می‌دهند.

ns, * and ** indicate non-significant effect, and significant effects at 5 and 1 percent probability levels, respectively.

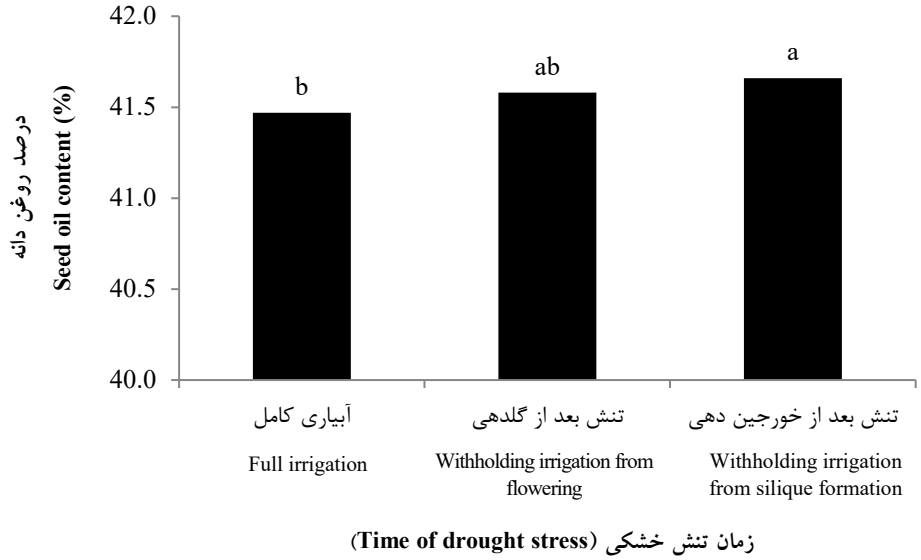
خشکی فعالیت آنزیم‌های کلیدی این مسیر را کاهش می‌دهد. در نهایت، نتایج بیان می‌کند که در مناطق مستعد خشکی، گزینش ژنوتیپ‌های دارای پاسخ فیزیولوژیک مطلوب می‌تواند هم به حفظ کیفیت روغن کلزا و هم به افزایش پایداری تولید منجر شود.

درصد روغن

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

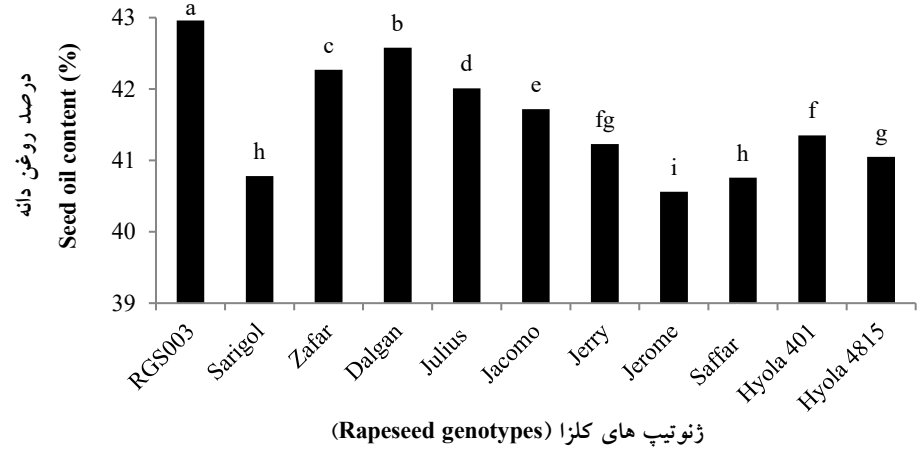
از نظر مقایسه ژنوتیپ‌ها، بیشترین درصد روغن دانه با ۹۶/۴۲ درصد در ژنوتیپ RGS003 به‌دست آمد. پس از این ژنوتیپ، ژنوتیپ‌های Dalgan، Zafar و Julius به‌ترتیب بیشترین درصد روغن را به خود اختصاص دادند. در مقابل، کمترین درصد روغن دانه با ۵۶/۴۰ درصد به ژنوتیپ Jerome تعلق داشت (شکل ۳).

پژوهش‌های پیشین نیز مؤید وجود تنوع ژنتیکی قابل توجه در صفت درصد روغن کلزا است. Zebarjadi et al. (2011) با بررسی ۱۴ ژنوتیپ کلزا، تفاوت معنی‌داری بین ژنوتیپ‌ها از نظر درصد روغن گزارش نمودند. در پژوهش دیگری نیز تفاوت معنی‌دار بین ژنوتیپ‌های مختلف کلزا از نظر این صفت مشاهده شد (Sher et al., 2017). یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر این اختلاف، تفاوت در طول دوره پرشدن دانه در ژنوتیپ‌های مختلف گزارش شده است.



شکل ۲. مقایسه میانگین درصد روغن دانه تحت تاثیر تیمارهای زمان تنش خشکی. حروف متفاوت بیانگر تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون توکی است.

Fig. 2. Mean comparisons of seed oil content affected by drought stress time treatments. Different letters indicate significant difference at 5% probability level based on Tukey's test.

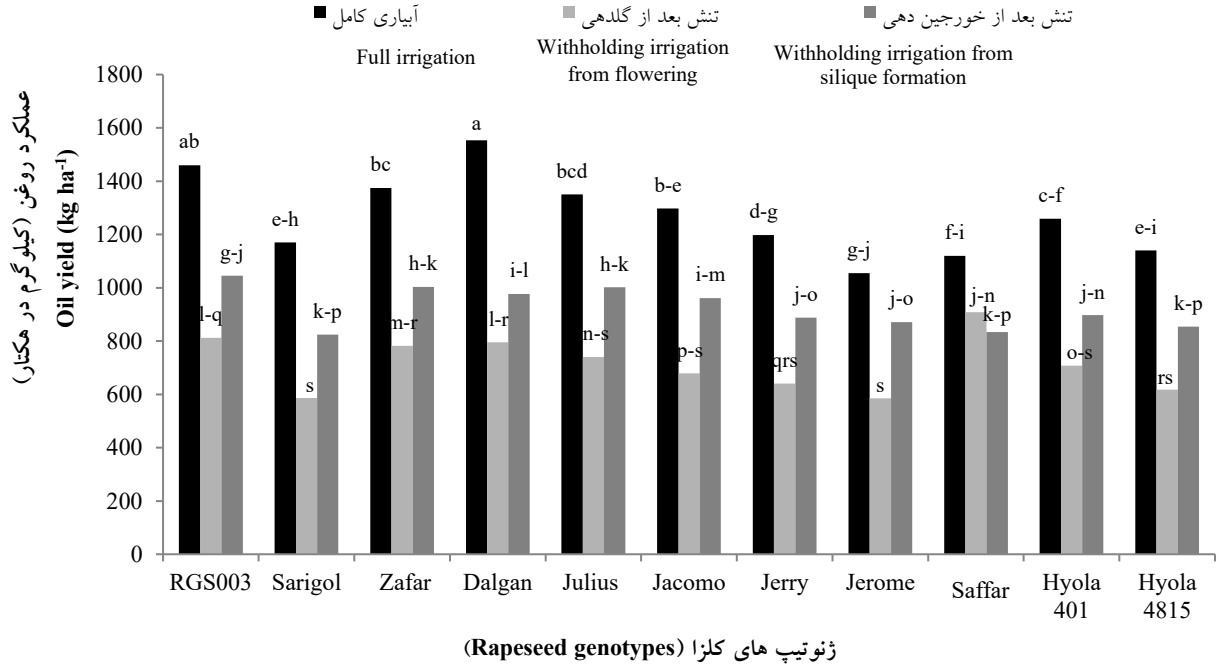


شکل ۳. مقایسه میانگین درصد روغن دانه در ژنوتیپ‌های کلزا. حروف متفاوت بیانگر تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون توکی است.

Fig. 3. Mean comparisons of seed oil content in the rapeseed genotypes. Different letters indicate significant difference at 5% probability level based on Tukey's test.

عملکرد روغن

نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان داد که عملکرد روغن به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر برهم‌کنش زمان تنش خشکی و ژنوتیپ قرار گرفت (جدول ۸). در این پژوهش، بیشترین عملکرد روغن دانه با ۱۵۵۳ کیلوگرم در هکتار در تیمار آبیاری کامل و ژنوتیپ Dalgan به‌دست آمد، درحالی‌که کمترین عملکرد روغن با ۵۸۴ کیلوگرم در هکتار به تیمار تنش خشکی پس از گل‌دهی و ژنوتیپ Jerome تعلق داشت (شکل ۴). در شرایط آبیاری کامل،



شکل ۴. مقایسه میانگین عملکرد روغن دانه تحت تاثیر برهمکنش زمان تنش خشکی و ژنوتیپ‌های مورد بررسی کلزا. حروف متفاوت بیانگر تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون توکی است.

Fig. 4. Mean comparisons of seed oil yield as affected by the interaction of drought stress time and rapeseed genotypes. Different letters indicate significant difference at 5% probability level based on Tukey's test.

ژنوتیپ‌های RGS003 و Dalgan بیشترین و ژنوتیپ‌های 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 ژنوتیپ RGS003 و کمترین آن در ژنوتیپ‌های Sarigol و Saffar مشاهده گردید. در تیمار تنش خشکی پس از گل‌دهی، بیشترین عملکرد روغن دانه با ۹۰۸ کیلوگرم در هکتار متعلق به ژنوتیپ Saffar و کمترین آن با ۵۸۵ و ۵۸۴ کیلوگرم در هکتار به‌ترتیب متعلق به ژنوتیپ‌های Sarigol و Jerome بود. اعمال تنش خشکی پس از گل‌دهی در تمامی ژنوتیپ‌ها، بیشترین کاهش عملکرد روغن دانه را به‌دنبال داشت (شکل ۴). به‌طوری‌که در ژنوتیپ‌های 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، ژنوتیپ Saffar با ۹/۱۸ درصد کاهش، کمترین کاهش عملکرد روغن را در مواجهه با تنش خشکی پس از گل‌دهی تجربه نمود. پژوهش‌های پیشین نیز مؤید تأثیر منفی کم‌آبی بر عملکرد کمّی و کیفی کلزا هستند. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که تنش خشکی اثر معنی‌داری بر عملکرد دانه و روغن کلزا دارد و عملکرد روغن با کاهش درصد روغن و به‌ویژه کاهش عملکرد دانه، تحت تأثیر کم‌آبی قرار می‌گیرد (Zarei et al., 2010). در بررسی‌های دیگر نیز تفاوت معنی‌دار بین ژنوتیپ‌های کلزا از نظر عملکرد روغن گزارش شده است که این تفاوت، عمدتاً به اختلاف در درصد روغن و وزن دانه تولیدی ژنوتیپ‌ها نسبت داده می‌شود (Chaghakaboodi et al., 2017; Zebarjadi et al., 2011; Sher et al., 2017). نتایج پژوهش حاضر نیز تأیید می‌کند که در شرایط تنش خشکی پس از خورجین‌دهی و پس از گل‌دهی، ژنوتیپ‌های مورد بررسی واکنش متفاوتی از نظر عملکرد روغن نشان دادند و این واکنش، کاملاً وابسته به ژنوتیپ و شدت تنش بود.

پروفیل اسیدهای چرب

اسید پالمیتیک

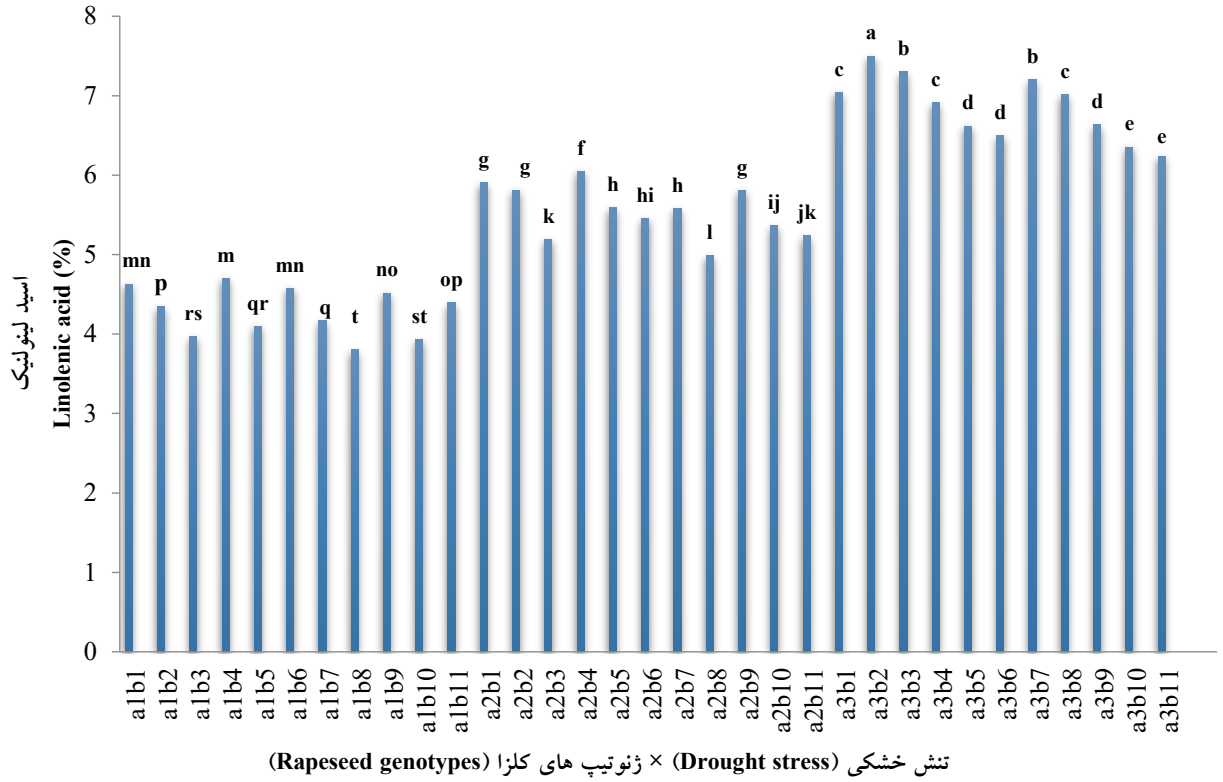
نتایج نشان داد که اثر برهمکنش تنش خشکی و ژنوتیپ بر درصد اسید پالمیتیک معنی‌دار بود، به‌طوری‌که بیشترین مقدار این اسید چرب اشباع (۶ درصد) در تیمار آبیاری کامل و ژنوتیپ Zafar مشاهده شد. پس از آن، تیمار آبیاری کامل با ژنوتیپ‌های Julius و Jerome قرار داشت. کمترین میزان (۹/۳ درصد) مربوط به تنش خشکی در مرحله خورجین‌دهی و ژنوتیپ Jerry بود. اختلاف آماری میان بیشینه و کمینه برابر ۱/۲ درصد، قابل توجه ارزیابی شد. ژنوتیپ‌های کلزا واکنش متفاوتی به تنش خشکی نشان دادند. ژنوتیپ‌های Zafar و Jerome بیشترین کاهش و ژنوتیپ‌های Hyola 4815 و Jacomo کمترین کاهش در درصد اسید پالمیتیک را تجربه کردند. به‌طورکلی، تنش خشکی باعث کاهش معنی‌دار این اسید چرب اشباع شد که با یافته‌های پژوهش‌های 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 ژنوتیپ‌های مختلف) نسبت داد که از اسیدهای چرب در برابر تنش محافظت می‌کنند (Kayaçetin et al., 2018).

اسید لینولنیک

نتایج نشان داد که اثر برهمکنش تنش خشکی و ژنوتیپ بر درصد اسید لینولنیک معنی‌دار بود (جدول ۷). بیشترین مقدار این اسید چرب غیراشباع (۷/۵ درصد) در تیمار تنش خشکی در مرحله خورجین‌دهی و ژنوتیپ Sarigol مشاهده شد. پس از آن، تیمار مشابه با ژنوتیپ‌های Zafar و Jerry قرار داشت. کمترین میزان (۳/۸ درصد) مربوط به تیمار آبیاری کامل و ژنوتیپ Jerome بود. دامنه تغییرات ۲/۷ درصدی بین بیشینه و کمینه، حاکی از تأثیر قابل‌توجه تنش خشکی و ژنوتیپ است (شکل ۵). به‌طور کلی، اعمال تنش خشکی از مرحله گل‌دهی به بعد در همه ژنوتیپ‌ها، 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 اسید لینولنیک) کاهش می‌یابد، درحالی‌که اسیدهای چرب اشباع افزایش نسبی می‌یابند. بین ژنوتیپ‌ها از نظر درصد اسید لینولنیک در همه تیمارهای تنش خشکی تفاوت معنی‌داری وجود داشت. این پاسخ متفاوت به عواملی چون فعالیت آنزیم‌های سازنده اسیدهای چرب، میزان فرآورده‌های فتوسنتزی، عناصر معدنی مؤثر و سطح آنتی‌اکسیدانت‌های دانه نسبت داده می‌شود (Liersch et al., 2020). پژوهش‌های دیگر نیز نتایج مشابهی گزارش کرده‌اند (Pokharel, 2013؛ Sooran et al., 2020؛ Rezaeizad et al., 2019). به‌عنوان نمونه، پژوهشی بر روی ژنوتیپ‌های مختلف کلزا 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 اسید لینولئیک به لینولنیک اسید را محدود می‌کند (Elferjani and Soolanayakanahally, 2018). همچنین، Kandil et al. (2017) نیز کاهش مشابهی را تحت تنش خشکی گزارش کردند.

اسید لینولئیک

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر برهمکنش تنش خشکی و ژنوتیپ بر درصد اسید لینولئیک معنی‌دار شد (جدول ۷). بیشترین مقدار این اسید چرب غیراشباع (۲۲ درصد) در تیمار آبیاری کامل و ژنوتیپ Jerome مشاهده شد. پس از آن، ترکیب‌های تیماری «آبیاری کامل + ژنوتیپ RGS003» و «آبیاری کامل + ژنوتیپ Zafar» قرار داشتند. در شرایط آبیاری کامل، بیشترین میزان اسید لینولئیک حاصل گردید (شکل ۶). 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، زیرا مرحله خورجین‌دهی و رشد خورجین حساس‌ترین مرحله به تنش‌های مؤثر بر تشکیل روغن دانه‌ها



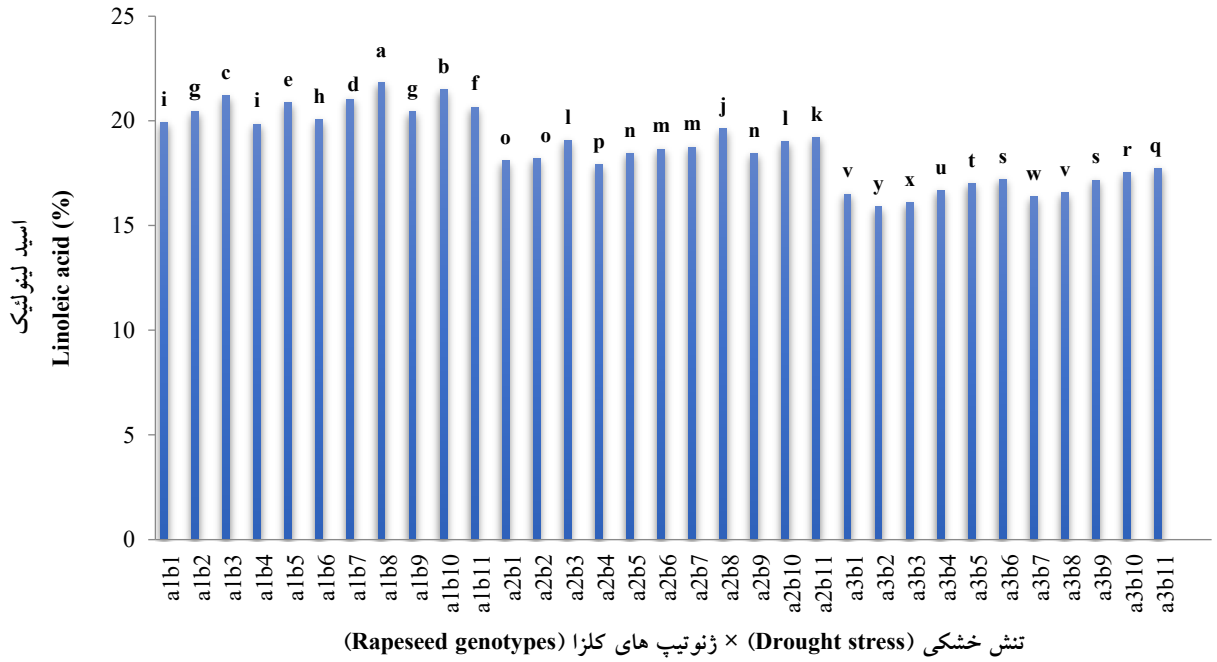
شکل ۵. مقایسه میانگین درصد اسید لینولنیک تحت تأثیر برهمکنش تیمارهای تنش خشکی و ژنوتیپ‌های کلزا. a1: آبیاری کامل، a2: تنش خشکی پس از خورجین‌دهی، a3: تنش خشکی پس از گل‌دهی و b1 تا b11: کد ژنوتیپ‌ها به‌ترتیب شامل RGS003، Sarigol، Zafar، Dalgan، Julius، Jacomo، Jerry، Jerome، Saffar، Hyola 401 و Hyola 4815. حروف متفاوت بیانگر تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون توکی است.

Fig. 5. Mean comparisons of percentages of linolenic acid as affected by the interaction of drought stress time and rapeseed genotypes. a1: full irrigation, a2: drought stress after pod setting, a3: drought stress after flowering, and b1 to b11: codes of genotypes consisting of RGS003, Sarigol, Zafar, Dalgan, Julius, Jacomo, Jerry, Jerome, Saffar, Hyola 401, and Hyola 4815, respectively. Different letters indicate significant differences at the 5% probability level based on Tukey's test.

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). ژنوتیپ‌های کلزا واکنش متفاوتی به تنش خشکی نشان دادند. در شرایط آبیاری کامل، ژنوتیپ‌های Jerome و Saffar بیشترین درصد اسید لینولئیک را داشتند. در تنش خشکی مرحله گل‌دهی، ژنوتیپ Jerome بیشترین مقدار اسید لینولئیک را به خود اختصاص داد. در تنش خشکی مرحله خورجین‌دهی، ژنوتیپ Hyola 4815 برتر بود. این نتایج نشان می‌دهد که ژنوتیپ، 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 کیفیت روغن می‌انجامد (Pokharel, 2013).

اسید اولئیک

بر اساس نتایج تجزیه واریانس، اثر برهمکنش تیمار زمان تنش خشکی و ژنوتیپ بر صفت درصد اسید اولئیک معنی‌دار شد (جدول ۷). با مقایسه میانگین درصد اسید اولئیک تحت تأثیر زمان تنش خشکی و ژنوتیپ مشاهده شد که بیشترین درصد اسید

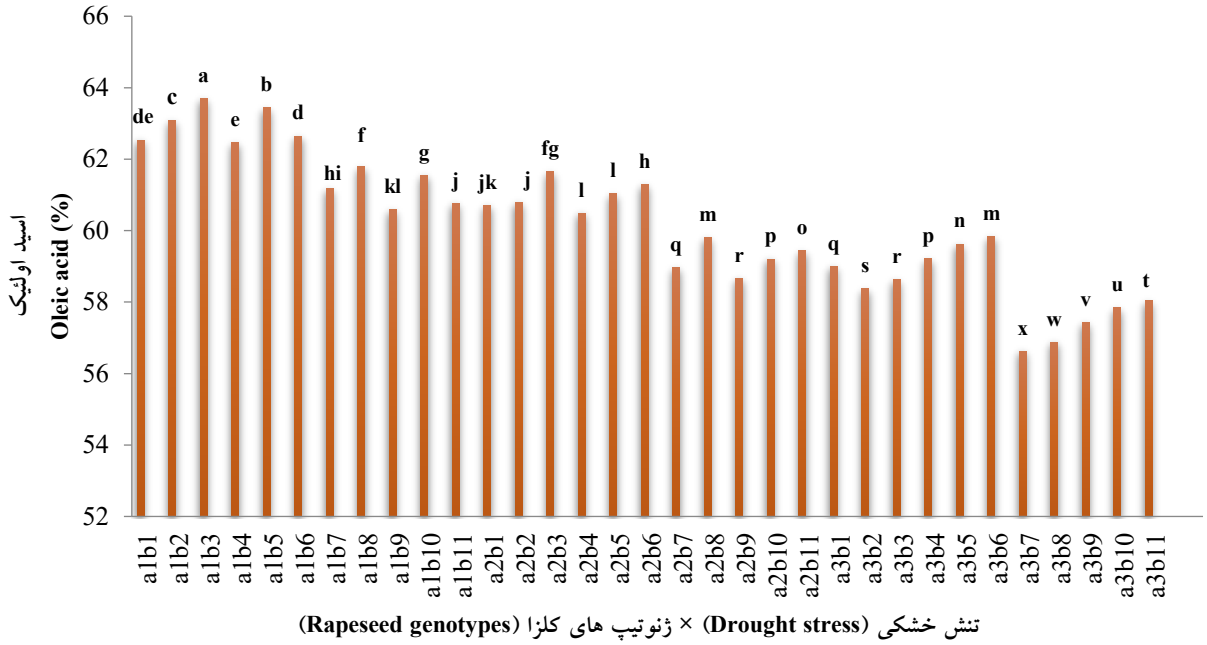


شکل ۶. مقایسه میانگین درصد اسید لینولئیک تحت تأثیر برهمکنش تیمارهای تنش خشکی و ژنوتیپ‌های کلزا. a1: آبیاری کامل، a2: تنش خشکی پس از خورجین‌دهی، a3: تنش خشکی پس از گل‌دهی و b1 تا b11: کد ژنوتیپ‌ها به‌ترتیب شامل RGS003، Sarigol، Zafar، Dalgan، Julius، Jacomo، Jerry، Jerome، Saffar، Hyola 401 و Hyola 4815. حروف متفاوت بیانگر تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون توکی است.

Fig. 6. Mean comparisons of percentages of linoleic acid as affected by the interaction of drought stress time and rapeseed genotypes. a1: full irrigation, a2: drought stress after pod setting, a3: drought stress after flowering, and b1 to b11: codes of genotypes consisting of RGS003, Sarigol, Zafar, Dalgan, Julius, Jacomo, Jerry, Jerome, Saffar, Hyola 401, and Hyola 4815, respectively. Different letters indicate significant differences at the 5% probability level based on Tukey's test.

اولئیک روغن دانه کلزا با ۶۴ درصد در آبیاری کامل + ژنوتیپ Zafar به‌دست آمد (شکل ۷). پس از این تیمار، ترکیب‌های تیماری آبیاری کامل + ژنوتیپ Julius و آبیاری کامل + ژنوتیپ 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 ژنوتیپ‌های Jerry، Jerome و Saffar به‌دست آمد. در هر سه تیمار زمان تنش خشکی، ژنوتیپ‌های RGS003، Sarigol، Zafar، Dalgan ، Julius و Jacomo درصد اسید اولئیک بیشتری را در مقایسه با ژنوتیپ‌های Jerry، Jerome، Saffar، Hyola 401 و Hyola 4815 به خود اختصاص دادند، با این تفاوت که تنش خشکی در تعدادی از ژنوتیپ‌ها کاهش بیشتری را در درصد اسید اولئیک باعث شد. ژنوتیپ Zafar با ۷/۸ درصد، بیشترین کاهش را در اثر تنش خشکی در مرحله خورجین‌دهی نشان داد، درحالی‌که ژنوتیپ Hyola 4815 کمترین کاهش را در اثر تنش خشکی در مرحله خورجین‌دهی نشان داد.

در پژوهش مشابه، تأثیر تنش خشکی در مرحله گل‌دهی کلزا مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که با ایجاد تنش خشکی در هر دو مرحله خورجین‌دهی و گل‌دهی، درصد اسید اولئیک روغن کلزا کاهش یافت. همچنین تفاوت معنی‌داری بین ژنوتیپ‌ها از نظر درصد اسید اولئیک در پاسخ به تنش خشکی در مراحل مختلف ثبت شد. Sooran et al. (2020) نیز گزارش نمودند که تنش خشکی باعث کاهش معنی‌دار درصد اسید اولئیک در روغن کلزا شد. همچنین Sharafi et al. (2015)



شکل ۷. مقایسه میانگین درصد اسید اولئیک تحت تأثیر برهمکنش تیمارهای تنش خشکی و ژنوتیپ‌های کلزا. a1: آبیاری کامل، a2: تنش خشکی پس از خورجین‌دهی، a3: تنش خشکی پس از گل‌دهی و b1 تا b11: کد ژنوتیپ‌ها به‌ترتیب شامل RGS003، Sarigol، Zafar، Dalgan، Julius، Jacomo، Jerry، Jerome، Saffar، Hyola 401 و Hyola 4815. حروف متفاوت بیانگر تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون توکی است.

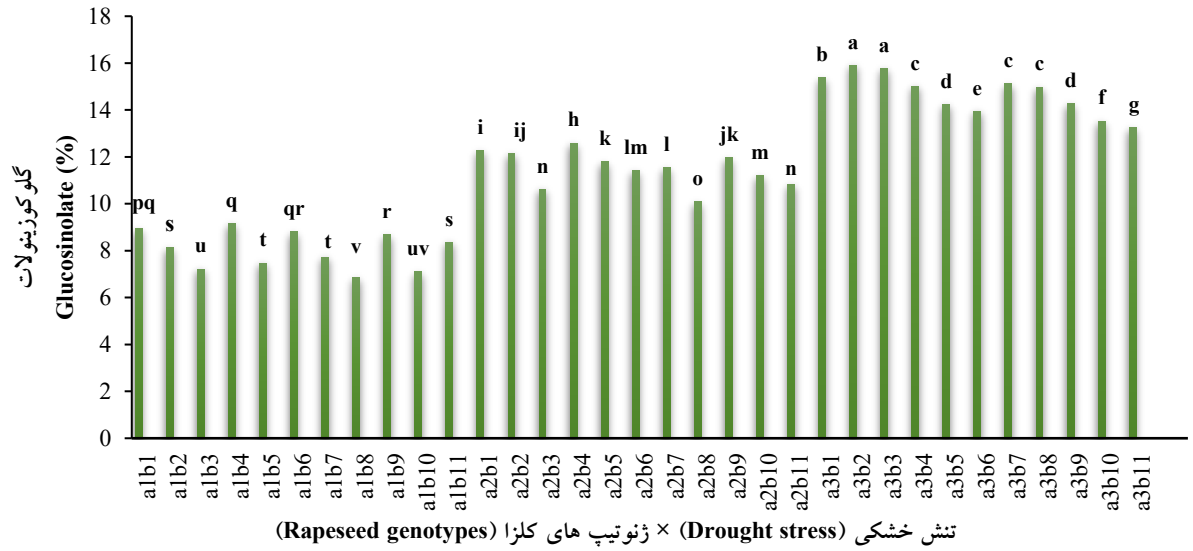
Fig. 7. Mean comparisons of percentages of oleic acid as affected by the interaction of drought stress time and rapeseed genotypes. a1: full irrigation, a2: drought stress after pod setting, a3: drought stress after flowering, and b1 to b11: codes of genotypes consisting of RGS003, Sarigol, Zafar, Dalgan, Julius, Jacomo, Jerry, Jerome, Saffar, Hyola 401, and Hyola 4815, respectively. Different letters indicate significant differences at the 5% probability level based on Tukey's test.

تعدادی از ژنوتیپ‌های کلزا را از نظر ویژگی‌های روغن مورد بررسی قرار داده و مشاهده نمودند که ژنوتیپ‌های کلزا از نظر درصد اسید اولئیک با یکدیگر تفاوت دارند. همچنین، این پژوهشگران تفاوت در میزان فعالیت مسیرهای تولید اسید اولئیک و تفاوت در فعالیت هورمون‌های ژنوتیپ‌های مختلف را مهم‌ترین دلیل متفاوت‌بودن درصد اسید اولئیک در کلزا گزارش نمودند.

اسید اروسیک

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که درصد اسید اروسیک به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر اثر برهمکنش زمان تنش خشکی و ژنوتیپ کلزا قرار گرفت (جدول ۷). در پژوهش حاضر، در تمامی ژنوتیپ‌های مورد بررسی تنش خشکی بر میزان اسید اروسیک کلزا که یک اسید چرب مضر به‌شمار می رود، افزود. ژنوتیپ‌های Zafar و Jerome بیشترین افزایش میزان اسید اروسیک را در شرایط تنش خشکی نشان دادند. در این دو ژنوتیپ با ایجاد تنش خشکی در مرحله خورجین‌دهی به‌ترتیب به میزان ۱۴۱ و ۱۳۰ درصد به اسید اروسیک روغن کلزا افزوده شد. درحالی‌که در ژنوتیپ Hyola 4815 کمترین میزان کاهش در درصد اسید اروسیک با تنش خشکی به‌دست آمد. بنابراین تنش خشکی از نظر درصد اسید اروسیک اثر متفاوتی در ژنوتیپ‌های مورد بررسی داشت (Pokhare, 2013).

تنش‌هایی مانند گرما، شوری و خشکی با اعمال تغییرات فیزیولوژیک باعث افزایش میزان تولید اسید اروسیک می‌شوند



شکل ۸. مقایسه میانگین میزان گلوکوزینولات تحت تأثیر برهمکنش تیمارهای تنش خشکی و ژنوتیپ‌های کلزا. a1: آبیاری کامل، a2: تنش خشکی پس از خورجین‌دهی، a3: تنش خشکی پس از گل‌دهی و b1 تا b11: کد ژنوتیپ‌ها به‌ترتیب شامل RGS003، Sarigol، Zafar، Dalgan، Julius، Jacomo، Jerry، Jerome، Saffar، Hyola 401 و Hyola 4815. حروف متفاوت بیانگر تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون توکی است.

Fig. 8. Mean comparisons of glucosinolate content as affected by the interaction of drought stress time and rapeseed genotypes. a1: full irrigation, a2: drought stress after pod setting, a3: drought stress after flowering, and b1 to b11: codes of genotypes consisting of RGS003, Sarigol, Zafar, Dalgan, Julius, Jacomo, Jerry, Jerome, Saffar, Hyola 401, and Hyola 4815, respectively. Different letters indicate significant differences at the 5% probability level based on Tukey's test

(Pokharel, 2016). چون توانایی ژنوتیپ‌های مختلف گیاهان در مواجهه با تنش‌ها متفاوت است، میزان تولید اسید اروسیک نیز در ژنوتیپ‌های کلزا به‌طور متفاوتی تحت تأثیر قرار خواهد گرفت (Mahmood et al., 2019). نتایج پژوهشی درباره تأثیر تنش خشکی بر ویژگی‌های روغن دانه کلزا نشان داد که محتوای درصد اسید اروسیک با اعمال تنش خشکی کاهش می‌یابد، همچنین تفاوت زیادی بین ژنوتیپ‌های مختلف کلزا از نظر میزان اسید اروسیک در پاسخ به سطوح مختلف تنش خشکی مشاهده شد (Kandil et al., 2017). پژوهش‌های دیگری نیز تأثیر تنش خشکی را بر ویژگی‌های روغن کلزا بررسی نموده و مشاهده کردند که تنش خشکی درصد اسید اروسیک روغن کلزا در ژنوتیپ‌های مورد بررسی را افزایش داد (Rezaeizad et al., 2019).

گلوکوزینولات

در این پژوهش، برهمکنش تنش خشکی و ژنوتیپ تأثیر معنی‌داری بر میزان گلوکوزینولات دانه کلزا داشت (جدول ۷). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که اعمال تنش خشکی سبب افزایش معنی‌دار میزان گلوکوزینولات شد (شکل ۸). در پژوهش‌های دیگری نیز گزارش شده است که تنش خشکی افزایش معنی‌داری در درصد گلوکوزینولات روغن و دانه کلزا ایجاد می‌کند (Kandil et al., 2017; Mahmood et al., 2019). در پژوهش حاضر، ژنوتیپ‌ها از نظر میزان تغییرات گلوکوزینولات تحت تأثیر تنش خشکی واکنش‌های متفاوتی نشان دادند؛ به‌طوری‌که ژنوتیپ Zafar بیشترین میزان گلوکوزینولات را در شرایط تنش خشکی در مرحله خورجین‌دهی به خود اختصاص داد، درحالی‌که ژنوتیپ Hyola 4815 کمترین نوسان در گلوکوزینولات را در اثر اعمال تیمارهای مختلف تنش نشان داد.

تولید اسید اروسیک و ترکیبات ثانویه در گیاهان توسط سیستم‌های آنزیمی مانند β–کتواسیل کوآنزیم آ سنتتاز هدایت می‌شود. نتایج پژوهش‌های گوناگون نشان داده است که میزان فعالیت آنزیم‌های درگیر در این فرایندها در ژنوتیپ‌های مختلف کلزا متفاوت بوده و این تفاوت‌ها تحت تأثیر تیمارهای تنش خشکی تشدید می‌شوند (Liersch et al., 2020). بررسی‌های انجام‌شده روی ژنوتیپ‌های مختلف کلزا نیز مؤید تفاوت معنی‌دار ژنوتیپ‌ها از نظر صفات کیفی و درصد گلوکوزینولات است (Kayaçetin et al., 2018).

نتیجه‌گیری نهایی

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که کلزا در مراحل مختلف رشد مانند جوانه‌زنی، رویشی، گل‌دهی و پرشدن دانه به تنش خشکی حساس است. تنش خشکی بر صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک تأثیر گذاشته و عملکرد روغن آن را به‌طور معنی‌داری کاهش داد، اگرچه میزان کاهش در ژنوتیپ‌های گوناگون متفاوت بود. همچنین سطوح مختلف تنش خشکی در ژنوتیپ‌های مورد بررسی اثر معنی‌داری بر اسیدهای چرب کلزا داشت و سبب کاهش عملکرد روغن در ژنوتیپ‌ها گردید. تنش خشکی در مراحل گل‌دهی و پرشدن دانه کاهش معنی‌داری در عملکرد روغن ژنوتیپ‌ها را سبب شد. به‌طورکلی ژنوتیپ‌هایی مانند Saffar یا ژنوتیپ‌های زودرس مشابه که بیشترین تحمل را در برابر تنش خشکی پس از گل‌دهی نشان دادند اهمیت زیادی دارند چرا که این ژنوتیپ‌ها می‌توانند دوره رشدی خود را بهتر و زودتر از سایر ژنوتیپ‌ها طی نمایند و در واقع تا حدی از تاثیر مضر تنش خشکی در امان بمانند. بنابراین کشت ژنوتیپ‌های 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 ژنوتیپ‌های مورد بررسی، ژنوتیپ‌های Dalgan و RGS003 تحمل بیشتری در برابر کم‌آبی پس از گل‌دهی و خورجین‌دهی داشتند. بنابراین می‌توان با انتخاب و معرفی ژنوتیپ‌های متحمل به تنش خشکی به کشاورزان و تولیدکنندگان از تاثیر کم‌آبی کاست و به پایداری تولید دانه دست یافت.

تشکر و سپاسگزاری

برخود لازم می‌دانیم از همکاران محترم مؤسسه تحقیقات، اصلاح و تهیه نهال و بذر و همچنین بخش تحقیقات دانه‌های روغنی مؤسسه، به‌ویژه استاد گرانقدر جناب آقای دکتر امیرحسین شیرانی‌راد، که در تمامی مراحل این پژوهش تلاش‌های ارزشمند و همکاری خوبی داشتند تشکر و قدردانی نماییم.

تضاد منافع

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

منابع مورد استفاده

References

1. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome.
2. Anonymous, 2020. IRAN Country Partnership Strategy. Eco. Trade and Development Bank.
3. 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.
4. 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. A279, 493–506. https://doi.org/10.1016/s0021-9673(01)93650-7.
5. Bouslama, M., Schapaugh Jr., W.T., 1984. Stress tolerance in soybeans. I. Evaluation of three screening techniques for heat and drought tolerance. Crop Sci. 24, 933–937. https://doi.org/10.2135/cropsci1984.0011183X002400050026x.
6. Bouyoucos, G.J., 1962. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. Agron. J. 54(5), 464–465. https://doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x.
7. Bremner, J.M., 1965. Total nitrogen. In: Black, C.A. (Ed.), Methods of Soil Analysis, Part 2: Chemical and Microbiological Properties. Agronomy Monograph No. 9. American Society of Agronomy, Madison, WI, pp. 1149–1178.

8. 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.
9. Chaghakaboodi, Z., Kakaei, M., Zebarjadi, A., 2017. Evaluation of rapeseed genotypes under drought stress conditions. J. Crop Breed. 9(22), 110–118.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Fathi, A., Barari Tari, D., 2016. Effect of drought stress and its mechanism in plants. Int. J. Life Sci. 10(1), 1–6.
14. Fernandez, G.C.J., 1992. Effective selection criteria for assessing stress tolerance. In: Kuo, C.G. (Ed.), Proceedings of the International Symposium on Adaptation of Vegetables and Other Food Crops in Temperature and Water Stress, AVRDC Publication, Tainan, pp. 257–270.
15. 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.
16. 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.
17. Hanway, J.J., Heidel, H., 1952. Soil Analysis Methods as Used in Iowa State College Soil Testing Laboratory. Iowa Agric. 57, 1–13.
18. 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.
19. 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. https://doi.org/ 10.21448/ijsm.474894.
20. 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. https://doi.org/ 10.3390/agriculture10120607.
21. 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.
22. Mesjedi, A., Shokouhfar, A., Alavifazel, M., 2008. Determination of the most suitable irrigation interval for summer 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)
23. Olsen, S.R., Cole, C.V., Watanabe, F.S., Dean, L.A., 1954. Estimation of Available Phosphorus in Soils by Extraction with Sodium Bicarbonate. USDA Circular No. 939. U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.
24. Peleg, Z., Reguera, M., Tumimbang, E., Waliwalte, H., Blumwald, E., 2011. Cytokinin-mediated source/sink modifications improve drought tolerance and grain yield in rice. Plant Biotechnol. J. 9(7), 747–758.
25. 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.
26. 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.
27. Pokharel, M., 2016. Physiological characterization of canola genotypes under water deficit stress. Agric. Water Manage. 170, 45–52.
28. 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.
29. Reza, 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.
30. 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)

31. Rhoades, J.D., 1996. Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. In: Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., Loeppert, R.H., Soltanpour, P.N., Tabatabai, M.A., Johnston, C.T., Sumner, M.E. (Eds.), Methods of Soil Analysis: Part 3—Chemical Methods. SSSA Book Series No. 5. Soil Science Society of America, Madison, WI, pp. 417–435.
32. Rosielle, A.A., Hamblin, J., 1981, Theoretical aspects of selection for yield in stress and non-stress environment. Crop Sci. 21, 943–946. https://doi.org/10.2135/cropsci1981.0011183X002100060033x.
33. 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.
34. 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.
35. 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.
36. 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.
37. 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.
38. 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), 105–112. https://doi.org/ 10.34044/j.anres.2020.54.1.15. (In Persian with English abstract)
39. Thomas, G.W., 1996. Soil pH and soil acidity. In: Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., Loeppert, R.H., Soltanpour, P.N., Tabatabai, M.A., Johnston, C.T., Sumner, M.E. (Eds.), Methods of Soil Analysis: Part 3—Chemical Methods. SSSA Book Series No. 5. Soil Science Society of America, Madison, WI, pp. 475–490.
40. 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.
41. 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.
42. Walkley, A., Black, I.A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Sci. 37(1), 29–38. https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003.
43. 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.
44. 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.