

Evaluation of rapeseed Mutants under Drought Stress at Flowering Stage in terms of Yield, Oil Percentage and Stress Tolerance Indices

Ayoub Niknam-Haghighi¹, Alireza Sirousmehr^{*2}, Azam Borzouei³, Behnam Naserian-Khiabani³, Mohsen Mousavinik²

Received: February 28, 2024

Accepted: April 24, 2025

1. Ph.D. Student in Agronomy - Crop Physiology, Dept. of Agronomy, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran
 2. Assoc. Prof. and Prof., Dept. of Agronomy, College of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran.
 3. Nuclear Agriculture Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Karaj, Iran.
- Corresponding Author Email: asirousmehr@uoaz.ac.ir

Abstract

Background & Objectives: Given the increasing limitation of water resources and the expansion of arid regions worldwide, identifying and utilizing drought-tolerant genotypes is considered one of the important priorities in crop plant breeding. This study was conducted to identify mutants with more stable yield and higher drought stress tolerance, as well as to find suitable strategies for crop production in arid environments.

Materials and Methods: The present study was carried out through two separate experiments (full irrigation and cessation of irrigation at the flowering stage) in a randomized complete block design (RCBD) with three replications during the years 2015-2016 and 2017-2018 at the research farm of the Nuclear Agriculture Research Institute in Karaj, Iran. In this experiment, seven rapeseed genotypes were evaluated, including three cultivars (Licord, Okapi, and RGS as controls) and four mutants derived from the RGS parental line (MRGS9, MRGS14, MRGS16, and MRGS31). The mutant lines were developed by irradiating the RGS cultivar with gamma irradiation from a cobalt-60 source at a dose of 950 Gy.

Results: The results showed that the MRGS31 genotype had the highest grain yield (1,457 kg/ha), 1000-grain weight (44.4 g), and biological yield (7,934.6 kg/ha) under both full irrigation and cessation of irrigation at the flowering stage. Additionally, the grain yield reduction of this genotype under drought stress was only 9.33%, the lowest among the studied genotypes. Among the stress tolerance indices, MP, GMP, and STI were identified as the best indices for selecting drought-tolerant genotypes due to their significant correlation with yield. Based on these indices and the biplot analysis, MRGS31 was identified as the most drought-tolerant genotype among the studied genotypes.

Conclusion: Rapeseed mutants showed the least reduction in grain yield under both full irrigation and cessation of irrigation at the flowering stage (where irrigation was applied equally before flowering, and drought stress was induced by stopping irrigation at the flowering stage). The highest and lowest reductions in grain yield under cessation of irrigation at flowering stage were observed in the RGS genotype (27.65%) and MRGS31 genotype (9.33%), respectively. These findings suggest that gamma radiation effectively improved plant tolerance to drought stress.

Keywords: Biplot, Gamma Irradiation, Grain Yield, Water Deficit, Geometric Mean

ارزیابی موتانت‌های کلزا تحت تنش خشکی در مرحله گلدهی از نظر عملکرد، درصد روغن و شاخص‌های تحمل به تنش

ایوب نیکنام حقیقی^۱، علیرضا سیروس‌مهر^{۲*}، اعظم برزوئی^۳، بهنام ناصریان خیابانی^۳، سید محسن موسوی‌نیک^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۰۹	تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۰۵
--------------------------	-------------------------

۱- دانشجوی دکتری رشته زراعت-فیزیولوژی گیاهان زراعی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل. زابل. ایران.

۲- دانشیار و استاد گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل. زابل. ایران.

۳- پژوهشکده کشاورزی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای. کرج. ایران.

چکیده

مقدمه و اهداف: با توجه به محدودیت روزافزون منابع آب و گسترش مناطق خشک در سراسر جهان، شناسایی و بهره‌گیری از ژنوتیپ‌های مقاوم به خشکی، یکی از اولویت‌های مهم در به‌نژادی گیاهان زراعی محسوب می‌شود. این مطالعه به منظور شناسایی موتانت‌های با عملکرد پایدارتر و تحمل بیشتر به تنش خشکی و یافتن راهکارهای مناسب در تولید محصول در محیط‌های خشک صورت گرفت.

مواد و روش‌ها: پژوهش حاضر در دو آزمایش جداگانه (آبیاری کامل و قطع آبیاری در مرحله گلدهی) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار، طی سال‌های ۹۵-۱۳۹۴ و ۹۷-۱۳۹۶ در مزرعه تحقیقاتی پژوهشکده کشاورزی هسته‌ای کرج انجام شد. در این آزمایش، هفت ژنوتیپ کلزا (سه رقم: لیکورد، اوکاپی، آرجی‌اس به‌عنوان شاهد و چهار موتانت از پایه مادری آرجی‌اس: ام‌آرجی‌اس ۹، ام‌آرجی‌اس ۱۴، ام‌آرجی‌اس ۱۶ و ام‌آرجی‌اس ۳۱) بررسی شد. لاین‌های جهش یافته از پرتودهی رقم آرجی‌اس با پرتو گاما، چشمه‌ی کبالت-۶۰ و دز ۹۵۰ گری ایجاد شده بودند.

یافته‌ها: نتایج نشان داد ژنوتیپ ام‌آرجی‌اس ۳۱ در هر دو شرایط آبیاری کامل و قطع آبیاری در مرحله گلدهی، بالاترین عملکرد دانه (۱۴۵۷ کیلوگرم در هکتار)، وزن هزار دانه (۴/۴۴ گرم) و عملکرد بیولوژیک (۷۹۳۴/۶ کیلوگرم) را دارا بود. همچنین، کاهش عملکرد دانه این ژنوتیپ تحت تنش خشکی تنها ۹/۳۳ درصد بود که کمترین میزان در بین ژنوتیپ‌ها محسوب می‌شد. از بین شاخص‌های تنش، شاخص‌های MP، GMP و STI به دلیل داشتن همبستگی معنی‌دار با عملکرد، بهترین شاخص‌ها برای انتخاب و تعیین ژنوتیپ‌های متحمل به تنش بودند. براساس شاخص‌های ذکر شده و نمودار بای‌پلات، ژنوتیپ ام‌آرجی‌اس ۳۱ به‌عنوان متحمل‌ترین ژنوتیپ به تنش خشکی در بین ژنوتیپ‌های مورد مطالعه شناسایی شد.

نتیجه‌گیری: موتانت‌های کلزا در هر دو شرایط آبیاری کامل و قطع آبیاری در مرحله گلدهی (به این ترتیب که تا پیش از مرحله گلدهی اعمال تیمار آبیاری در هر دو شرایط یکسان انجام گرفت و تنش خشکی به‌صورت قطع آبیاری در مرحله گلدهی اجرا شد) کمترین افت عملکرد دانه نسبت به تیمار شاهد داشتند به طوری که بیشترین و کمترین افت عملکرد دانه در شرایط قطع آبیاری در مرحله گلدهی به ترتیب متعلق به ژنوتیپ‌های آرجی‌اس (۲۷/۶۵ درصد) و ام‌آرجی‌اس ۳۱ (۹/۳۳ درصد) بود. به‌طوریکه می‌توان نتیجه گرفت، اشعه گاما به خوبی توانسته اثر مثبتی روی تحمل گیاه در برابر تنش خشکی بگذارد.

واژه‌های کلیدی: اشعه گاما، بای پلات، عملکرد دانه، کم‌آبی، میانگین هندسی

مقدمه

ساختار خود را از دست می‌دهند و فعالیت کربوکسیلاسیون چرخه کربس را کاهش می‌دهند. در شرایط تنش خشکی، ارزیابی عملکرد ارقام مختلف نقطه شروعی برای شناسایی ارقام متحمل به خشکی است (منجم و همکاران ۲۰۱۱). یکی از شاخص‌های ارزیابی ژنوتیپ‌ها در شرایط محیطی مختلف، شاخص پایداری عملکرد است که عملکرد یک ژنوتیپ را در شرایط تنش و بدون تنش اندازه‌گیری می‌کند. به منظور برآورد این شاخص، عملکرد در شرایط تنش و در شرایط بدون تنش بررسی و در نهایت، ژنوتیپ با شاخص پایداری عملکرد بالاتر در هر دو شرایط انتخاب می‌شود (اکتاس و همکاران ۲۰۱۶). سه شاخص میانگین بهره‌وری (MP)، میانگین هندسی بهره‌وری (GMP) و شاخص تحمل به تنش (STI) را به‌عنوان شاخص‌های کاربردی در ارزیابی ارقام کلزا در نظر گرفته شده است که در شرایط تنش بیشترین همبستگی مثبت و معنی‌دار را با عملکرد دانه دارد (مجیدی و همکاران ۲۰۱۵). همپنین استفاده از تکنیک‌های آماری پیشرفته مانند نمودارهای پلات و تجزیه مسیر، ابزاری قدرتمند برای شناسایی ژنوتیپ‌های پایدار است. این روش‌ها با تحلیل همزمان شاخص‌های تنش و عملکرد، امکان دسته‌بندی ژنوتیپ‌ها به گروه‌های متحمل، حساس، و با عملکرد پایدار را فراهم می‌کند (بخشی و همکاران ۲۰۲۳).

مرحله گلدهی به دلیل حساسیت بالای گیاه به کم‌آبی، یکی از بحرانی‌ترین مراحل رشد برای بررسی تأثیر تنش خشکی محسوب می‌شود (تایو و همکاران ۲۰۲۰). در این مرحله، تنش خشکی می‌تواند باعث کاهش فتوسنتز، اختلال در گرده‌افشانی و تشکیل غلاف، و در نهایت کاهش عملکرد دانه شود (راضا و همکاران ۲۰۱۷) و از آنجایی که گیاه کلزا در اکثر مناطق ایران با تنش

کلزا (*Brassica napus* L.) به دلیل دارا بودن اسیدهای چرب مناسب و روغن بالا (۴۰ الی ۴۶ درصد)، نقش کلیدی در تأمین نیازهای غذایی و صنعتی ایفا می‌کند. با این حال، تغییرات اقلیمی و افزایش تنش‌های محیطی مانند خشکی، تولید این محصول را با چالش‌های جدی مواجه کرده است (زالی و همکاران ۲۰۲۰). تنش خشکی با کاهش فشار تورمی سلول‌های گیاهی با جلوگیری از رشد گیاهی بر فرآیندهای بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی گیاهان تأثیر منفی می‌گذارد (لیانگ و همکاران ۲۰۱۹). تنش خشکی باعث بسته شدن روزنه، جلوگیری از ورود CO₂، کاهش میزان فتوسنتز و عدم تعادل در دریافت نور شده که در نهایت منجر به تولید بیش از حد گونه‌های فعال اکسیژن^۱ (ROS) می‌شود (ممدی و همکاران ۲۰۱۸). گونه‌های فعال اکسیژن شامل مولکول‌هایی مانند سوپراکسید، پراکسید هیدروژن و رادیکال‌های هیدروکسیل هستند که به‌عنوان محصولات جانبی متابولیسم سلولی در شرایط عادی و تنش‌های محیطی تولید می‌شوند. در شرایط تنش مانند خشکی، شوری، و دمای بالا، تولید ROS افزایش می‌یابد (ساچدو و همکاران ۲۰۲۱؛ نور و همکاران ۲۰۲۴). تجمع گونه‌های فعال اکسیژن در سلول‌های گیاهی می‌تواند به اجزای سلولی آسیب برساند و باعث اختلال در عملکرد طبیعی سلول‌ها شود. گیاهان برای مقابله با این آسیب‌ها، سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی خود را فعال می‌کنند که این آنزیم‌ها گونه‌های فعال اکسیژن را به ترکیبات کم‌خطرتر تبدیل می‌کنند (پاندا و همکاران ۲۰۲۴). افزایش گونه‌های فعال اکسیژن می‌تواند با افزایش پراکسیداسیون لیپیدی به غشای سلولی آسیب برساند (ژانگ و همکاران ۲۰۱۹). همچنین، به دلیل تنفس نوری، پروتئین و غشای آن،

¹ Reactive Oxygen Species



خشکی آخر فصل مواجه می‌گردد، لذا برای اتخاذ یک تصمیم‌گیری کاربردی، انجام پژوهش‌های بیشتری در راستای شناسایی موتانت‌های با عملکرد پایدارتر و تحمل بیشتر به تنش خشکی و یافتن راهکارهای مناسب در تولید محصول در محیط‌های خشک، ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین این مطالعه به منظور بررسی مقایسه عملکرد و اجزای عملکرد در بین هفت ژنوتیپ کلزا (سه رقم شاهد و چهار لاین موتانت) در دو شرایط آبیاری کامل و قطع آبیاری در مرحله گلدهی اجرا شد.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در مزرعه تحقیقاتی پژوهشکده کشاورزی هسته‌ای کرج (طول ۵۰ درجه و ۵۷ ثانیه شرقی و عرض ۳۵ درجه و ۴۸ دقیقه شمالی) در دو سال زراعی ۹۵-۱۳۹۴ و ۱۳۹۷-۱۳۹۶ در دو آزمایش جداگانه در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. در این آزمایش، هفت ژنوتیپ کلزا (سه رقم: لیکورد، اوکابی، آرچی اس به عنوان شاهد و چهار موتانت از پایه مادری آرچی اس: ام آرچی اس ۹، ام آرچی اس ۱۴، ام آرچی اس ۱۶ و ام آرچی اس ۳۱) مورد بررسی قرار گرفت. لاین‌های جهش یافته از پرتودهی رقم آرچی اس با پرتو گاما، چشمه‌ی کبالت-۶۰ و دز ۹۵۰ گری و از سیستم پرتودهی چشمه ایستا (با میزان دُز کنترل شده) ایجاد شده بودند. گزینش برای صفات زراعی و عملکرد از نسل

دوم انجام شد و در نسل پنجم بر اساس آزمون مقدماتی عملکرد از میان ۳۲ ژنوتیپ، ۴ موتانت پر محصول انتخاب و در آزمایش حاضر بررسی شدند (ناصریان خیابانی و علیزاده ۲۰۱۸). لاین‌های جهش یافته به همراه سه رقم شاهد در دو شرایط آبیاری به شکل آبیاری کامل و قطع آبیاری در مرحله گلدهی اجرا گردید. به این ترتیب که تا پیش از مرحله گلدهی اعمال تیمار آبیاری در هر دو شرایط یکسان انجام گرفت و تنش خشکی به صورت قطع آبیاری در مرحله گلدهی معادل کد ۴/۱ بر اساس سیستم کدبندی سیلوستر بردلی (سیلوستربردلی ۱۹۸۵) اجرا شد و مشخصات ژنوتیپ‌ها و اقلیمی مزرعه در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است. پس از عملیات آماده‌سازی زمین که شامل شخم، دیسک و لولر جهت تسطیح بود، براساس نتایج آزمایش‌های تجزیه خاک (جدول ۳)، در هر دو شرایط ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن خالص در هکتار (۱/۲) در مرحله چهار برگی و ۱/۲ در زمان ساقه رفتن و ۱۵۰ کیلوگرم فسفات آمونیم در هکتار به صورت یکنواخت در سطح مزرعه پخش شد. سپس کرت‌هایی به مساحت شش مترمربع با فاصله بین هر بلوک سه متر و فاصله بین هر کرت یک متر برای هر دو شرایط آماده گردید. بذره‌ای یکنواخت و سالم کلزا در تاریخ ۱۰ مهر به صورت دستی روی هر ردیف کشت شدند و تراکم ۴۰ بوته در مترمربع در نظر گرفته شد. کشت هر دو آزمایش به صورت همزمان انجام شد.

جدول ۱- ویژگی‌های مهم ژنوتیپ‌های مورد مطالعه

ژنوتیپ	مبدا	تیپ رشدی	مقاومت به بیماری	مقاومت به آفات	طول دوره رشد
لیکورد	آلمان	پاییزه	زیاد	زیاد	۲۳۴-۲۳۷
اوکابی	فرانسه	پاییزه	متوسط	متوسط	۲۳۴-۲۳۷
آرچی اس	آلمان	بهاره	متوسط	متوسط	۲۱۹-۲۲۴ ۱۲۰-۱۴۵
ام آرچی اس ۹	ایران	پاییزه	متوسط	متوسط	-
ام آرچی اس ۱۴	ایران	پاییزه	متوسط	متوسط	-
ام آرچی اس ۱۶	ایران	پاییزه	متوسط	متوسط	-
ام آرچی اس ۳۱	ایران	پاییزه	متوسط	متوسط	-

محاسبه شد. برای اندازه‌گیری ارتفاع اولین شاخه فرعی، در انتهای مرحله رشد، از هر کرت تعداد ده بوته بصورت تصادفی انتخاب و ارتفاع اولین شاخه فرعی اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری درصد روغن دانه با دستگاه سوکسوله به روش زیر انجام شد. ۲ گرم دانه‌ی آسیاب شده را داخل کاغذ صافی وزن کرده سپس کاغذ صافی را تا

به منظور اندازه‌گیری عملکرد دانه، در انتهای فصل رشد (اواخر خرداد)، با رعایت اثر حاشیه، به صورت تصادفی یک مترمربع از هر کرت برداشت و عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک اندازه‌گیری شد. وزن هزار دانه از توزین چهار نمونه صدتایی بذر به دست آمد. شاخص برداشت نیز از نسبت عملکرد دانه به عملکرد بیولوژیک

جدول ۲- داده‌های هواشناسی منطقه مورد مطالعه در طول فصل رشد

ماه	T min (°C)	T max (°C)	بارندگی (mm)	RH (%)				
سال اول	سال دوم	سال اول	سال دوم	سال اول	سال دوم			
مهر	۱۲/۹	۱۰/۲	۲۴/۲	۲۲/۷	۱۰/۲	۴۲/۹	۳۳/۲	
آبان	۴/۵	۲/۸	۱۳/۳	۱۴/۵	۳۸/۲	۱۰/۸	۵۶/۱	۳۹/۸
آذر	-۱	۰	۷	۸/۹	۲۲/۷	۵۸/۲	۶۷/۲	۵۵/۱
دی	۰/۹	-۱	۱۰/۱	۸/۷	۳۳/۴	۳۲/۶	۴۹/۸	۵۳
بهمن	۲	-۲/۶	۱۳/۷	۸/۱	۱۱/۲	۱۹	۴۱/۹	۵۲/۷
اسفند	۶	۴/۴	۱۷	۱۴/۳	۲۷/۹	۳۲/۴	۳۹/۹	۴۹/۵
فروردین	۹/۶	۹/۶	۲۱/۶	۲۱/۳	۲۰/۴	۳۰	۴۱/۹	۴۲
اردیبهشت	۱۶/۳	۱۶/۶	۲۹/۲	۲۹/۲	۱۰	۲۰	۲۹/۶	۲۹/۷
خرداد	۱۹/۹	۲۰	۳۳/۲	۳۴/۲	۰	۰	۲۲/۵	۲۱/۶۶

جدول ۳- نتایج آزمون فیزیکی و شیمیایی آب و خاک محل اجرای آزمایش

رس	سیلت	شن	کلاس	پتاسیم قابل جذب	فسفر قابل جذب	نیتروژن (%)	اسیدیته	هدایت الکتریکی	عمق نمونه برداری (cm)	هدایت الکتریکی آب آبیاری (dS.m ⁻¹)
(%)	(%)	(%)	بافت خاک	(mg. kg ⁻¹)	(mg. kg ⁻¹)	(%)	(dS.m ⁻¹)	(dS.m ⁻¹)		
۲۸/۳	۱۸	۵۳/۷	Sandy clay loam	۹۵/۸	۱۰/۵	۰/۰۷	۷/۲	۲/۴	۰-۴۰	۱/۴
۲۸/۱	۱۸/۲	۵۳/۷	Sandy clay loam	۱۰۳/۲	۱۲/۳	۰/۰۹	۷/۵	۲/۶	۰-۴۰	۱/۶

و حرارت‌دهی به مدت ۱ ساعت ادامه یافت. پس از آن دستگاه را خاموش کرده و محتویات داخل کاغذ صافی وزن گردید. سپس آن را به آون منتقل کرده تا حلال به

کرده و در داخل قسمت استخراج کننده قرار داده شد. سپس حلال را داخل استخراج کننده ریخته تا یک بار عملیات سیفون کردن از سوکسوله به داخل بالن انجام شود. سپس مبرد را وصل کرده و جریان آب برقرار شد



طور کامل خشک شده و مجدداً وزن شد (جوشی و همکاران ۱۹۹۸).

$$M2 - M1 / M1 \times 100 = \text{درصد روغن}$$

وزن نمونه + کاغذ صافی در انتهای کار = M2

وزن نمونه + کاغذ صافی در ابتدای کار = M1

برای بررسی ارقام مورد مطالعه از نظر حساسیت

و مقاومت به تنش خشکی، از شاخص‌های تنش شامل

$$\text{بوسلما و شاپو ۱۹۸۴} \quad YSI = \frac{Y_s}{\bar{Y}_p} \quad (۴)$$

$$\text{فرناندز ۱۹۹۲} \quad STI = \frac{Y_p \times Y_s}{\bar{Y}_p^2} \quad (۵)$$

$$\text{فرناندز ۱۹۹۲} \quad GMP = \sqrt{Y_s \times Y_p} \quad (۶)$$

شاخص حساسیت به تنش (SSI)، شاخص تحمل (TOL)، میانگین بهره‌وری (MP)، شاخص پایداری عملکرد (YSI)، شاخص تحمل تنش (STI) و میانگین هندسی بهره‌وری (GMP) استفاده شد. برای محاسبه شاخص‌های مورد نظر از روابط زیر استفاده گردید.

$$\text{فیشر و مولر ۱۹۸۷} \quad SSI = \frac{1 - \frac{Y_s}{\bar{Y}_p}}{1 - \frac{\bar{Y}_s}{\bar{Y}_p}} \quad (۱)$$

$$\text{روزیل و هامبلین ۱۹۸۷} \quad TOL = Y_p - Y_s \quad (۲)$$

$$\text{روزیل و هامبلین ۱۹۸۷} \quad MP = \frac{Y_s + Y_p}{2} \quad (۳)$$

ژنوتیپ‌ها در تمامی صفات تأیید کرد که ام‌آرجی‌اس ۳۱ با کمترین کاهش عملکرد دانه (۹/۳۳ درصد) (شکل ۲)، بالاترین وزن هزار دانه تحت تنش (۴/۴۴ گرم) (شکل ۱)، و پایدارترین درصد روغن دانه (۴۰/۸۹ درصد) (جدول ۶)، برترین ژنوتیپ در تحمل خشکی بود. در مقابل، آرجی‌اس با بیشترین کاهش عملکرد دانه (۲۷/۶۵ درصد)، کمترین وزن هزار دانه (۲/۶۵ گرم)، و پایین‌ترین درصد روغن (۳۶/۱۸ درصد) تحت تنش، حساس‌ترین ژنوتیپ شناسایی شد. عملکرد بیولوژیک نیز تحت تنش خشکی به‌طور میانگین ۲۴/۷ درصد (از ۷۲۶۳ به ۵۴۶۷ کیلوگرم در هکتار) کاهش یافت (شکل ۳). اما آرجی‌اس ۱۶ در شرایط تنش خشکی، بالاترین کارایی انتقال مواد به دانه (۱۹/۴۵ درصد) را نشان داد، در حالی که آرجی‌اس با ۱۴/۱۲ درصد کمترین مقدار را ثبت کرد (شکل ۴). این نتایج، اهمیت انتخاب ژنوتیپ‌های پایدار و تأثیر متقابل محیط بر پاسخ ژنوتیپ‌های مورد بررسی در مدیریت کشت کلزا تحت شرایط تنش خشکی برجسته می‌سازد.

پس از آزمون یکنواختی داده‌ها، تجزیه واریانس صفات انجام و میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد مقایسه شد. تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، ترسیم نمودار بای‌پلات، و تجزیه واریانس صفات و میانگین‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای SAS ver. 9.1 و Minitab ver. 14 انجام شد. همچنین تجزیه ضرایب مسیر توسط نرم افزار Path analysis صورت گرفت.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس مرکب دو ساله نشان داد اثر برهمکنش سال × ژنوتیپ بر تمامی صفات غیرمعنی‌دار است و بیان‌کننده پایداری پاسخ ژنوتیپ‌ها به تنش خشکی در طول سال‌های مختلف است. با این حال، اثر سه‌گانه سال × مکان × ژنوتیپ بر صفات وزن هزار دانه، عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، و درصد روغن در سطح ۱ درصد معنی‌دار شد (جدول ۴)، که نشان می‌دهد واکنش ژنوتیپ‌های مورد بررسی به تنش خشکی به شدت تحت تأثیر قرار گرفته است. اختلاف معنی‌دار بین

جدول ۴- تجزیه واریانس مرکب صفات مورد مطالعه در پاسخ به تیمارهای آزمایش

منابع تغییر	درجه آزادی	ارتفاع اولین شاخه	وزن هزار دانه	عملکرد دانه	عملکرد بیولوژیک	شاخص برداشت	درصد روغن
سال	۱	۳۹۷/۳۲*	۸/۶۳ ^{ns}	۱۴۷۴۶۴/۵۴**	۷۵۸۸۴۰/۶۲**	۱/۴۵ ^{ns}	۲۰۴/۳۶**

۷۸/۰۳ ^{**}	۱۷/۲۰ ^{**}	۶۷۷۸۲۰۳۴/۹۸ ^{**}	۱۰۲۵۴۴۴/۴۳ ^{**}	۸۹/۴۲ [*]	۲۱۶۹/۰۵ [*]	۱	مکان
۰/۱۳ ^{ns}	۰/۰۳ ^{ns}	۴۰۶۶۹۰/۹۳ ^{ns}	۱۱۳۷۲/۲۸ ^{ns}	۰/۱۳ ^{ns}	۳/۴۹ ^{ns}	۱	سال × مکان
۳/۹۶	۰/۱۴	۱۰۹۲۴۷/۸۸	۳۱۵۹/۲۸	۰/۲۱	۵۴/۶۱	۸	بلوک (سال × مکان)
۲/۱۵ ^{**}	۱/۰۶ ^{**}	۲۸۸۸۸۴۷/۷۵ [*]	۱۸۸۸۴۹/۴۵ [*]	۳۶/۴۳ [*]	۱۵۱/۶۱ ^{**}	۶	ژنوتیپ
۹/۲۸ ^{ns}	۰/۰۶ ^{ns}	۱۸۷۹۵۰/۷۳ ^{ns}	۴۳۶۱/۰۳ ^{ns}	۲/۶۸ ^{ns}	۲/۳۲ ^{ns}	۶	سال × ژنوتیپ
۰/۱۱ ^{ns}	۰/۰۳ [*]	۴۳۳۸۸۴/۷۳ [*]	۲۱۷۷۷/۱۸ [*]	۶/۷۹ [*]	۴۵/۹۰ ^{**}	۶	مکان × ژنوتیپ
۹/۹۰ ^{**}	۰/۰۵ ^{ns}	۳۷۶۴۰۷/۵۴ ^{**}	۷۴۲۱/۴۸ ^{**}	۱/۳۱ ^{**}	۰/۹۷ ^{ns}	۶	سال × مکان × ژنوتیپ
۱/۶۷	۰/۰۰۹	۲۶۹۷۸/۲	۱۲۵۰/۱۲	۰/۲۴	۴/۸۴	۴۸	خطا
۱۹/۹۰	۱۰/۳۲	۷/۵۹	۶/۳۳	۶/۰۷	۸/۷۰		ضریب تغییرات (%)

^{ns}، ^{*} و ^{**} به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد است.

ارتفاع اولین شاخه فرعی

بر اساس تجزیه واریانس مرکب دو ساله، تحت شرایط آبیاری کامل و قطع آبیاری در مرحله گلدهی، اثر متقابل مکان × ژنوتیپ تفاوت معنی‌دار در سطح ۱ درصد برای ارتفاع اولین شاخه فرعی نشان داد (جدول ۴). مقایسه میانگین در شرایط آبیاری کامل نشان داد که بالاترین میانگین ارتفاع اولین شاخه فرعی به ژنوتیپ لیکورد به میزان ۵۵ (سانتی‌متر) و پایین‌ترین میانگین به ژنوتیپ آرجی‌اس به میزان ۴۱ (سانتی‌متر) اختصاص داشت (جدول ۵). در شرایط قطع آبیاری در مرحله گلدهی، بالاترین و پایین‌ترین میانگین ارتفاع اولین شاخه فرعی به ترتیب با مقادیر ۶۱ و ۵۳ (سانتی‌متر) را ژنوتیپ‌های لیکورد و آم‌آرجی‌اس ۹ نشان دادند (جدول ۵). با افزایش تعداد شاخه فرعی، ارتفاع تشکیل شاخه‌ی فرعی کاهش می‌یابد که در شرایط تنش با توجه به کاهش تعداد شاخه فرعی، ارتفاع آن افزایش یافته است (نادری عارفی و عابدینی اصفهانی ۲۰۱۳). بطور کلی تنش خشکی اغلب باعث تسریع گل‌دهی و تشکیل بذر می‌شود

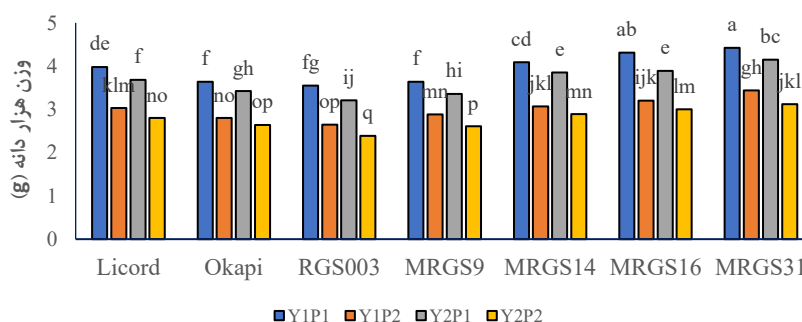
تا گیاه قبل از تشدید تنش، چرخه زندگی خود را کامل کند. اولین شاخه فرعی ممکن است به‌عنوان بخشی از این سازوکار، در ارتفاع بالاتری تشکیل شود تا به تولیدمثل کمک کند. از طرفی تنش خشکی باعث افزایش تولید هورمون ABA می‌شود (نور و همکاران ۲۰۲۴). این هورمون رشد جوانه‌های جانبی نزدیک به پایه گیاه را مهار می‌کند. در نتیجه، انرژی گیاه به جای توسعه شاخه‌های پایینی، به سمت رشد طولی ساقه هدایت می‌شود و اولین شاخه فرعی در ارتفاع بالاتری تشکیل می‌شود (سلیمان و همکاران ۲۰۲۱). پایین بودن ارتفاع اولین شاخه فرعی از سطح زمین می‌تواند دارای مزایا و معایبی باشد. مزایای فاصله کمتر شاخه فرعی با زمین این است که میزان خورجین‌ها در بوته افزایش می‌یابد و معایب آن این است که در برداشت مکانیزه می‌تواند دچار مشکل شود. بطورکلی ارتفاع شاخه فرعی در بین ژنوتیپ‌های کلزا متفاوت می‌باشد که در پاسخ به تیمارهای تنش واکنش نشان می‌دهند (خوشنام و همکاران ۲۰۰۷ و اوزونی دوجی و همکاران ۲۰۰۶).

جدول ۵- مقایسه میانگین دو سال اثرات متقابل مکان × ژنوتیپ بر ارتفاع اولین شاخه فرعی (آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد)

ژنوتیپ						
لیکورد	اوکابی	آرجی‌اس	ام‌آرجی‌اس ۹	ام‌آرجی‌اس ۱۴	ام‌آرجی‌اس ۱۶	ام‌آرجی‌اس ۳۱
۵۵/۴۵cd	۴۸/۲۳f	۴۱/۷۳h	۴۲/۲gh	۵۰/۶۶ef	۴۴/۸۵g	۴۸/۷۶f
۶۱/۳a	۶۲/۵۳a	۵۶/۱۹bc	۵۳/۱۵de	۵۶/۷۷bc	۵۸/۳۷b	۵۵/۸bcd

دانه بیشتر شده است. کاهش وزن هزار دانه در اثر تنش خشکی احتمالاً به دلیل کاهش جذب آب و املاح توسط گیاه و به دنبال آن کاهش ساخت و انتقال آسیمیلاتها به دانه‌ها بوده است که در این شرایط گیاه حتی با انتقال مجدد ذخایر اندوخته شده خود نیز نتوانسته کاهش آسیمیلات ناشی از تنش را جبران نماید و این وضعیت منجر به کاهش وزن دانه‌ها گردید (شیرانی راد و زندی ۲۰۱۴). همچنین انتقال کمتر آسیمیلاتها به خورجین، منجر به سقط جنین و کاهش وزن هزار دانه شد. کمبود کربوهیدرات به خورجین ممکن است منجر به سقط خورجین در کلزا در اواخر گل‌دهی و مراحل پر شدن خورجین شود (پاسبان اسلام و همکاران ۲۰۱۷). وزن دانه، تابعی از سرعت و طول دوره پر شدن آن است که از دو منبع فتوسنتز جاری و انتقال مجدد مواد ذخیره‌ای در گیاه تامین می‌شود و عموماً تحت تاثیر طول دوره بین گرده‌افشانی و رسیدگی قرار می‌گیرد (دانشمند و همکاران ۲۰۰۸). وجود تنش‌های محیطی مانند کمبود آب به ویژه در مراحل تشکیل و پر شدن دانه‌ها به دلیل کاهش در میزان فتوسنتز جاری، انتقال مجدد مواد، سرعت و طول دوره پر شدن دانه، منجر به کاهش وزن دانه می‌شود (زیرگلی و کهریزی ۲۰۱۵).

بر اساس تجزیه واریانس مرکب دو ساله، تحت شرایط آبیاری کامل و قطع آبیاری در مرحله گلدهی، اثر متقابل سال $\times$ مکان $\times$ ژنوتیپ تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد برای وزن هزار دانه نشان داد (جدول ۴). بیشترین و کمترین وزن هزار دانه به ترتیب مربوط به ژنوتیپ‌های ام‌آرجی‌اس ۳۱ و آرجی‌اس بود (شکل ۱). در سال اول، مقایسه میانگین‌ها در شرایط آبیاری کامل نشان داد که بیشترین و کمترین وزن هزار دانه متعلق به ژنوتیپ‌های ام‌آرجی‌اس ۳۱ (۴/۴۲ گرم) و آرجی‌اس (۳/۵۵ گرم) بود. همچنین بیشترین و کمترین وزن هزار دانه به ترتیب در ژنوتیپ‌های ام‌آرجی‌اس ۳۱ (۳/۴۴ گرم) و آرجی‌اس (۲/۶۵ گرم) در شرایط قطع آبیاری در مرحله گلدهی مشاهده شد (شکل ۱). در سال دوم مقایسه میانگین‌ها در شرایط آبیاری کامل نشان داد که بیشترین و کمترین وزن هزار دانه متعلق به ژنوتیپ‌های ام‌آرجی‌اس ۳۱ (۴/۱۵ گرم) و آرجی‌اس (۳/۲۱ گرم) بود. همچنین بیشترین و کمترین وزن هزار دانه به ترتیب در ژنوتیپ‌های ام‌آرجی‌اس ۳۱ و ام‌آرجی‌اس ۱۶ در شرایط قطع آبیاری در مرحله گلدهی مشاهده شد (شکل ۱). وجود شرایط محیطی مناسب رشد گیاه کلزا در آزمایش آبیاری کامل باعث شده است که مواد فتوسنتزی قابل انتقال به دانه‌ها در طی مراحل نمو افزایش یافته و وزن



شکل ۱- مقایسه میانگین دو سال ترکیبات تیماری سال $\times$ مکان $\times$ ژنوتیپ برای وزن هزار دانه (آزمون چند دامنه ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد)

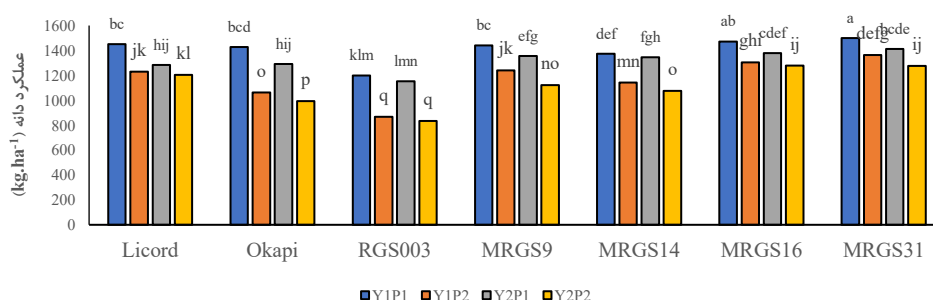
عملکرد دانه

احتمال ۱ درصد برای عملکرد دانه نشان داد (جدول ۴). بیشترین و کمترین عملکرد دانه به ترتیب مربوط به ژنوتیپ‌های ام‌آرجی‌اس ۳۱ و آرجی‌اس بود (شکل ۲). در سال اول، مقایسه میانگین‌ها در شرایط آبیاری کامل

بر اساس تجزیه واریانس مرکب دو ساله، تحت شرایط آبیاری کامل و قطع آبیاری در مرحله گلدهی، اثر متقابل سال $\times$ مکان $\times$ ژنوتیپ تفاوت معنی‌داری در سطح

فتوسنتزی گیاه و قدرت منبع کاهش می‌یابد که این عوامل باعث کاهش عملکرد شده است (حمزه‌ای و سلطانی ۲۰۱۲). تنش خشکی انتهای فصل در مرحله گلدهی تأثیر مستقیمی بر گرده افشانی، تشکیل بذر و عملکرد دانه دارد. وقتی گیاه در مرحله رشد خورجین با کم‌آبی مواجه شود انتقال مواد مغذی به دانه‌ها کاهش می‌یابد. بنابراین به دلیل کاهش تعداد و اندازه خورجین‌ها، عملکرد کاهش می‌یابد (فروغی و همکاران ۲۰۱۹). گزارش شده است که کاهش عملکرد دانه در شرایط تنش آبی، متأثر از کاهش اجزای عملکرد مانند وزن هزار دانه، ارتفاع بوته و وزن ماده خشک می‌باشد (توحیدی‌مقدم و همکاران ۲۰۱۱ و بیطرفان و شیرانی‌راد ۲۰۱۲). تنش خشکی در مرحله زایشی (مرحله رشد گل تا تشکیل خورجین) تأثیر مستقیمی روی تشکیل خورجین می‌گذارد. که نتیجه‌ی آن کاهش تعداد خورجین در بوته و کاهش دانه در خورجین می‌شود که در نهایت منجر به کاهش عملکرد دانه می‌شود (صباغ و همکاران ۲۰۱۹). همچنین با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، به نظر می‌رسد مرحله گلدهی و نمو خورجین‌ها در کلزا مرحله بحرانی است و اعمال تنش آبی در این مرحله به دلیل تأثیر نامطلوب در جذب مواد مغذی، باعث کاهش عملکرد دانه می‌شود.

نشان داد که بیشترین و کمترین عملکرد دانه متعلق به ژنوتیپ‌های ام‌آرجی‌اس ۳۱ و آرجی‌اس بود. همچنین بیشترین و کمترین عملکرد دانه به ترتیب در ژنوتیپ‌های ام‌آرجی‌اس ۳۱ و آرجی‌اس در شرایط قطع آبیاری در مرحله گلدهی مشاهده شد (شکل ۲). در سال دوم مقایسه میانگین‌ها در شرایط آبیاری کامل نشان داد که بیشترین و کمترین عملکرد دانه متعلق به ژنوتیپ‌های ام‌آرجی‌اس ۳۱ و آرجی‌اس بود. همچنین بیشترین و کمترین عملکرد دانه به ترتیب در ژنوتیپ‌های ام‌آرجی‌اس ۱۶ و آرجی‌اس در شرایط قطع آبیاری در مرحله گلدهی مشاهده شد (شکل ۲). درصد کاهش عملکرد دانه در ژنوتیپ‌های ام‌آرجی‌اس ۳۱، ام‌آرجی‌اس ۱۶، ام‌آرجی‌اس ۱۴، ام‌آرجی‌اس ۹، آرجی‌اس، اوکاپی و لیکورد در شرایط قطع آبیاری در مرحله گلدهی نسبت به ژنوتیپ‌های تحت شرایط آبیاری کامل به ترتیب ۹/۳۳، ۱۱/۲۲، ۱۸/۴۶، ۱۵/۴۶، ۲۷/۶۵، ۲۴/۴۱ و ۱۱/۱۶ بود. این نتایج نشان داد که ژنوتیپ آرجی‌اس بیشترین کاهش عملکرد (۲۷/۶۵ درصد) و ژنوتیپ ام‌آرجی‌اس ۳۱ کمترین افت عملکرد (۹/۳۳ درصد) را دارد (شکل ۳). با اعمال تنش خشکی انتهای فصل در مرحله گلدهی، جذب آب توسط ریشه کاهش می‌یابد. در نتیجه راندمان



شکل ۲- مقایسه میانگین دو سال ترکیبات تیماری سال × مکان × ژنوتیپ برای عملکرد دانه (آزمون چند دامنه ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد)

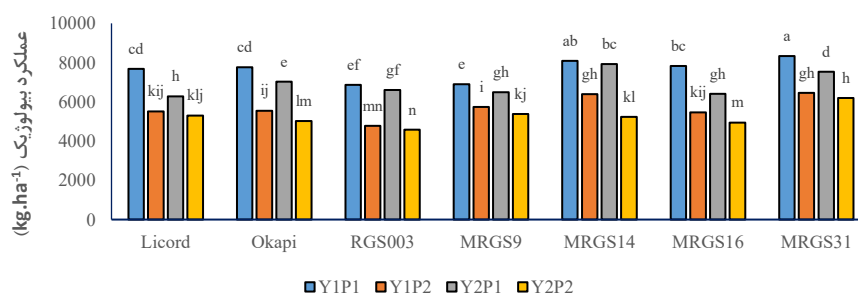
عملکرد بیولوژیک

بر اساس تجزیه واریانس مرکب دو ساله، در شرایط آبیاری کامل و قطع آبیاری در مرحله گلدهی، اثر متقابل سال × مکان × ژنوتیپ تفاوت معنی‌داری را در سطح احتمال ۱ درصد برای فعالیت عملکرد بیولوژیک

نشان داد (جدول ۴). بیشترین و کمترین عملکرد بیولوژیک به ترتیب مربوط به ژنوتیپ‌های ام‌آرجی‌اس ۳۱ و آرجی‌اس بود (شکل ۳). در سال اول، مقایسه میانگین آبیاری کامل نشان داد که بیشترین میانگین عملکرد بیولوژیک متعلق به ژنوتیپ ام‌آرجی‌اس ۳۱ (۸۳۳۱/۳)

کیلوگرم در هکتار) و کمترین میانگین متعلق به ژنوتیپ آرچی اس ۶۸۶۸/۲) کیلوگرم در هکتار) بود. قطع آبیاری در مرحله ی گلدهی باعث کاهش معنی داری در عملکرد بیولوژیک نسبت به شرایط آبیاری کامل شد به طوری که در شرایط قطع آبیاری در مرحله گلدهی، بیشترین و کمترین عملکرد بیولوژیک به ترتیب توسط ژنوتیپ های ام آرچی اس ۳۱ (۶۴۵۴/۳) کیلوگرم در هکتار) و آرچی اس ۴۷۶۸/۷) کیلوگرم در هکتار) به دست آمد (شکل ۳). همچنین در سال دوم در شرایط آبیاری کامل، بیشترین و کمترین عملکرد بیولوژیک به ترتیب توسط ژنوتیپ های ام آرچی اس ۱۴ (۷۹۲۱/۳) کیلوگرم در هکتار) و لیکورد (۶۲۸۳/۸) کیلوگرم در هکتار) به دست آمد. در شرایط تنش خشکی انتهای فصل، بیشترین و کمترین عملکرد بیولوژیک به ترتیب توسط ژنوتیپ های ام آرچی اس ۳۱ (۴۵۸۱/۷) کیلوگرم در هکتار) و آرچی اس ۴۵۸۱/۷) کیلوگرم در هکتار) به دست آمد (شکل ۳). عملکرد بیولوژیک در شرایط قطع آبیاری در مرحله گلدهی به

طور معنی داری کمتر از شرایط آبیاری کامل بود، به طوری که در طی دو سال آزمایش عملکرد بیولوژیک از ۷۲۶۳ کیلوگرم در هکتار در شرایط آبیاری کامل به ۵۴۶۷ (کیلوگرم در هکتار) در شرایط قطع آبیاری در مرحله گلدهی تقلیل یافت (شکل ۳). کاهش عملکرد بیولوژیکی ارتباط مستقیمی با کاهش عملکرد دانه و کاه و کلش دارد و تنش خشکی منجر به کاهش ذخیره مواد فتوسنتزی در ساقه و برگ می شود که منجر به کاهش اندازه بوته، سطح برگ، تسریع پیری برگ و کاهش ذخیره سازی مواد فتوسنتزی در ساقه می شود که این امر باعث کاهش عملکرد بیولوژیکی کلزا می شود (دوامی و همکاران ۲۰۲۱). تنش کم آبی در طی مراحل گلدهی تا رسیدگی موجب کاهش عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک می گردد (مسعود سیناکی و همکاران ۲۰۰۷). در طی آزمایشی گزارش شده است که تغییرات وزن خشک کلزا در دو شرایط آبیاری ۴۵۰۰ متر مکعب و ۳۰۰۰ مترمکعب به وضوح نمایان بود (حمزه ای و سلطانی ۲۰۱۲).



شکل ۳- مقایسه میانگین دو سال ترکیبات تیماری سال × مکان × ژنوتیپ برای عملکرد بیولوژیک (آزمون چند دامنه ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد).

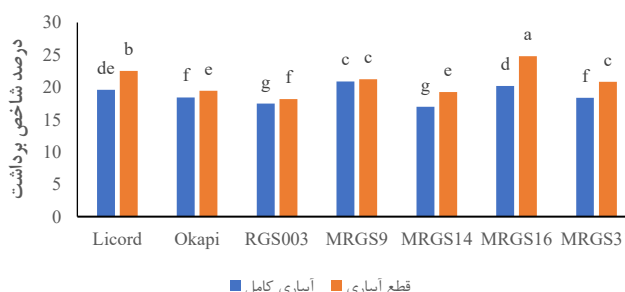
شاخص برداشت

بر اساس تجزیه واریانس مرکب دو ساله، تحت شرایط آبیاری کامل و قطع آبیاری در مرحله گلدهی، اثر متقابل مکان × ژنوتیپ تفاوت معنی داری را در سطح احتمال ۵ درصد برای شاخص برداشت نشان داد (جدول ۴). تاثیر تنش خشکی بر شاخص برداشت در شرایط قطع آبیاری و آبیاری کامل نشان داد که بالاترین و پایین ترین شاخص برداشت در بین ژنوتیپ های تحت شرایط آبیاری کامل به ترتیب متعلق به ام آرچی اس ۹ (۲۰/۸۸)

درصد) و ام آرچی اس ۱۴ (۱۶/۹۸ درصد) بود (شکل ۴). مقایسه میانگین های شاخص برداشت نشان می دهد که بین ژنوتیپ ها اختلاف معنی داری وجود دارد. به نظر می رسد ژنوتیپ ام آرچی اس ۳۱ با اینکه شاخص برداشت کمتری دارد ولی عملکرد بالاتری را نشان می دهد. همچنین در بین ژنوتیپ های تحت شرایط تنش خشکی، بالاترین شاخص برداشت در ژنوتیپ ام آرچی اس ۱۶ و پایین ترین شاخص برداشت ژنوتیپ آرچی اس مشاهده شد (شکل ۴). نتایج مشابهی در رابطه با تأثیر فصل

مهم در افزایش عملکرد محسوب می‌شود (یدالهی و همکاران ۲۰۱۶). بالاتر بودن شاخص برداشت به این معنی است که سهم بذر از کل ماده خشک تولیدی گیاه افزایش یافته است. به عبارت دیگر، مقدار زیادی از جذب فتوسنتزی به دانه‌ها منتقل می‌شود. اما در تنش خشکی به دلیل کاهش تعرق، انتقال مواد جذب شده به کندی انجام می‌شود. ارقام با شاخص برداشت بالاتر در تنش خشکی عملکرد بهتری در انتقال مواد از منبع به مخزن دارند (صفری و همکاران ۲۰۲۳).

کاشت بر عملکرد شاخص برداشت گزارش شده است (جمشیدی و همکاران ۲۰۱۲). همچنین گزارش نشان داده است که آبیاری تأثیر معنی‌داری بر شاخص برداشت دو رقم کلزای بهاره ندارد. شاخص برداشت معیاری از کارایی انتقال مواد فتوسنتزی تولید شده در گیاه به دانه می‌باشد (فرجی و همکاران ۲۰۰۹) و یکی از معیارهایی است که در تخمین کارایی توزیع مواد جذب شده به بذر یا بخش اقتصادی گیاهان مورد استفاده قرار می‌گیرد و به دلیل تأثیر کمتر بر شرایط محیطی، یکی از شاخص‌های



شکل ۴- مقایسه میانگین دو سال ترکیبات تیماری مکان × ژنوتیپ برای شاخص برداشت (آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد)

درصد روغن دانه (۴۰/۸۹ درصد) و اوکاپی (۳۶/۱۸ درصد) در شرایط قطع آبیاری در مرحله گلدهی مشاهده شد (جدول ۶). تنش کم‌آبی بر اساس دور آبیاری ۱۴ روز کاهش چشمگیری بر درصد روغن دانه کلزا در مقایسه با دور آبیاری هفت روز نداشته است (زارعی و همکاران ۲۰۱۰). به طور کلی عوامل ژنتیکی از پارامترهای اصلی تعیین کننده درصد روغن دانه کلزا است و تأثیر عوامل محیطی بر درصد روغن دانه بسیار کم می‌باشد (سلیمانی و همکاران ۲۰۱۰). در بررسی‌ها نشان داده شده است که کاهش محسوس عملکرد روغن را در شش رقم کلزا در شرایط قطع آبیاری از گل‌دهی به بعد را گزارش کرده‌اند (شرقی و همکاران ۲۰۱۱). در بررسی دیگری نیز قطع آبیاری از مرحله گل‌دهی سبب افت عملکرد روغن در ۲۲ رقم کلزای پائیزه شد (رشیدی و همکاران ۲۰۱۲). به طور متوسط، درصد روغن ژنوتیپ‌های تحت شرایط تنش خشکی و گرما در مقایسه با ژنوتیپ‌های تحت شرایط آبیاری کامل به میزان ۲۹ درصد کاهش می‌یابد (الفرجانی

درصد روغن دانه

بر اساس تجزیه واریانس مرکب دو ساله، تحت شرایط آبیاری کامل و قطع آبیاری در مرحله گلدهی، اثر متقابل سال × مکان × ژنوتیپ تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد برای درصد روغن دانه نشان داد (جدول ۴). در سال اول، مقایسه میانگین‌ها در شرایط آبیاری کامل نشان داد که بیشترین و کمترین درصد روغن دانه متعلق به ژنوتیپ‌های آرچی‌اس (۴۶/۸۶ درصد) و ام‌آرچی‌اس ۹ (۴۴/۷۳ درصد) بود. همچنین بیشترین و کمترین درصد روغن به ترتیب در ژنوتیپ‌های اوکاپی (۴۴/۲۲ درصد) و لیکورد (۴۱/۳۲ درصد) در شرایط قطع آبیاری در مرحله گلدهی مشاهده شد (جدول ۶). در سال دوم مقایسه میانگین‌ها در آزمایش آبیاری کامل نشان داد که بیشترین و کمترین درصد روغن دانه متعلق به ژنوتیپ‌های ام‌آرچی‌اس ۳۱ (۴۲/۷۷ درصد) و آرچی‌اس (۳۸/۳۴ درصد) بود. همچنین بیشترین و کمترین درصد روغن دانه به ترتیب در ژنوتیپ‌های ام‌آرچی‌اس ۳۱

و سولانای (۲۰۱۸). علاوه بر این، دیواره‌های خورجین همراه با برگ‌ها در مراحل پس از گلدهی، منابع قابل توجهی از فتوسنتز می‌باشد (بنت و همکاران، ۲۰۱۱؛ هوا و همکاران ۲۰۱۲). بنابراین، عوامل تنش‌زا در طی گلدهی می‌تواند بر رشد خورجین تأثیر بگذارد و متعاقباً فتوااسمیلات موجود برای بیوسنتز تری اسیل گلیسرول و تجمع روغن در دانه‌ها را کاهش دهد. همچنین کاهش درصد روغن در شرایط تنش خشکی ممکن است به دلیل کاهش طول فصل رشد باشد (صفوی‌فرد و همکاران ۲۰۱۸). همچنین، گیاهان تحت شرایط تنش خشکی، ABA بیشتری به برگ‌ها ترابری می‌کنند. این ABA به بذر منتقل می‌شود و منجر به کاهش درصد روغن دانه می‌شود (کوهن و همکاران، ۲۰۰۹).

تجزیه ضرائب مسیر اجزای عملکرد دانه

به منظور تعیین اهمیت صفات در تغییرات مربوط به عملکرد، تجزیه ضرائب مسیر انجام شد. در آزمایش قطع آبیاری در مرحله گلدهی، نتایج تجزیه ضرائب مسیر نشان داد که صفت وزن هزار دانه اثر مثبت و زیادی (۰/۶۸) بر عملکرد دانه داشت. همچنین این اثر تحت تأثیر اثر مثبت و بسیار کم و غیر مستقیم از طریق صفت ارتفاع اولین شاخه فرعی (۰/۰۲) قرار گرفت. این بدان معناست که همبستگی مثبت و بالا (۰/۶۸) بین این صفت و عملکرد

دانه، تأثیر آن روی عملکرد نهایی حدود ۰/۷ می‌باشد (جدول ۷). این یافته‌ها با مطالعات مشابه (بیژنی و همکاران ۲۰۲۳) همخوانی دارد که نشان می‌دهد وزن هزار دانه از عوامل اصلی موثر در افزایش عملکرد دانه است. به عبارت دیگر، وزن هزار دانه بالاتر به طور مستقیم به عملکرد بالاتر دانه منجر می‌شود و به نظر می‌رسد که این صفت برای بهبود عملکرد در شرایط تنش خشکی، به ویژه در دوره گلدهی، حیاتی است. در مقابل، ارتفاع اولین شاخه فرعی به رغم همبستگی مثبت با عملکرد دانه، اثر منفی نسبتاً ضعیفی بر عملکرد دانه داشت. ضریب مسیر این صفت نشان می‌دهد که این تأثیر غیرمستقیم و اندک بوده است (ضریب ۰/۰۲) و به طور مستقیم اثر منفی (۰/۰۵-) بر عملکرد دانه داشت (جدول ۷). به عبارت دیگر، با اینکه افزایش ارتفاع اولین شاخه فرعی می‌تواند به تعداد بیشتر خورجین‌ها کمک کند و سطح فتوسنتزی فعال را افزایش دهد (دهقانی و همکاران، ۲۰۰۹)، اما در این تحقیق نشان داده شد که اثر منفی از طریق کاهش وزن هزار دانه ممکن است باعث کاهش عملکرد دانه شود. این مسأله به این دلیل است که افزایش ارتفاع شاخه‌ها می‌تواند منجر به تخصیص انرژی بیشتر به رشد رویشی و کاهش آن به سمت تولید دانه‌ها شود، که در نهایت بر عملکرد نهایی تأثیر منفی دارد.

جدول ۶- مقایسه میانگین دو سال ترکیبات تیماری سال × مکان × ژنوتیپ برای درصد روغن (آزمون چند دامنه ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد)

ژنوتیپ (سال اول)						
لیکورد	اوکابی	آرجی اس	ام آرجی اس ۹	ام آرجی اس ۱۴	ام آرجی اس ۱۶	ام آرجی اس ۳۱
۴۳/۵۷bcde	۴/۵۲bcdefgh	۴۶/۸۶a	۷۳/۴۴b	۴۳/۲۵bcdefg	۴۴/۳۹bc	۴۳/۶۳bcde
f	۲					
۴/۳۲efghij	۴۴/۲۲bcd	۴/۷۵bcdefgh	۴۱/۶۲efghij	۴/۰۴cdefghi	۴۲/۳۳bcdefghi	۴۱/۷۱defghij
۱		۲		۲		
(سال دوم)						
۴/۰۳fghijk	۴۱/۷efghij	۳۸/۳۴l	۴۰/۴۷hijkl	۴۱/۵۵efghij	۴۱/۸۱defghij	۴/۷۷bcdefgh
۱						۲
۳۸/۶۸kl	۳۶/۱۸m	۳۸/۶۷jl	۳۹/۹۸ijkl	۳۹/۳۶jkl	۳۹/۸۷ijkl	۴۰/۸۹ghijk

جدول ۷- ضرایب مسیر اجزای عملکرد دانه در آزمایش قطع آبیاری (مرحله گلدهی)

صفت	اثر کل	اثر مستقیم	اثر غیر مستقیم	
وزن هزار دانه	۰/۷	۰/۶۸	-	ارتفاع اولین شاخه فرعی
ارتفاع اولین شاخه فرعی	۰/۱۴	-۰/۰۵	۰/۱۹	وزن هزار دانه
باقی‌مانده = ۰/۲۴				

این نتایج به روشنی نشان دادند که ارزیابی عملکرد نهایی و ارتباط آن با صفات مختلف در آزمایش قطع آبیاری در مرحله گلدهی، برای انتخاب ارقام با عملکرد بالا ضروری است. تجزیه ضرائب مسیر به شکل مناسبی می‌تواند برای این امر بکار گرفته شود (ضابط و همکاران ۲۰۱۶ و حاکان اوزر و همکاران ۱۹۹۹). از آنجا که وزن هزار دانه اثر مستقیم قوی بر عملکرد دانه دارد. از طرف دیگر، اثر مستقیم منفی ارتفاع شاخه فرعی بر عملکرد دانه، این هشدار می‌دهد که افزایش بی‌رویه ارتفاع شاخه فرعی ممکن است عملکرد نهایی را کاهش دهد. بنابراین، بهینه سازی همزمان این دو صفت برای دستیابی به ژنوتیپ‌های پایدار ضروری است.

شاخص‌های کمی تحمل تنش

نتایج نشان داد که اختلاف معنی‌داری (سطح احتمال ۵ درصد) از نظر شاخص‌های کمی تحمل به خشکی در آزمایش قطع آبیاری در مرحله گلدهی وجود دارد که نشان‌دهنده وجود تنوع ژنتیکی و امکان انتخاب برای تحمل به خشکی و دورگه‌گیری جهت مطالعات ژنتیکی و اصلاحی می‌باشد (جدول ۸). ژنوتیپ ام‌آرجی‌اس ۳۱ بیشترین میانگین بهره‌وری (۱۳۸۹)، شاخص عملکرد (۱/۱۵)، شاخص پایداری عملکرد (۰/۹۰۷)، شاخص تحمل تنش (۱/۰۳۵)، میانگین هندسی بهره‌وری (۱۳۸۷)، میانگین هارمونیک بهره‌وری (۱۳۸۵) و شاخص تحمل تنش تغییر یافته (۱/۳۸) را داشت که این ژنوتیپ اختلاف معنی‌داری با ژنوتیپ ام‌آرجی‌اس ۱۶ نشان نداد (جدول ۸). به‌منظور تفکیک دقیق‌تر ارقام مورد مطالعه، پس از محاسبه شاخص‌های تحمل به تنش و تخمین همبستگی بین آن‌ها و عملکرد دانه در آزمایش تنش خشکی انتهای فصل بای‌پلات انجام شد. نتایج نشان داد که رابطه مثبت و معنی‌داری بین عملکرد دانه در

آزمایش قطع آبیاری در مرحله گلدهی با شاخص‌های MP، GMP و STI وجود دارد. بنابراین می‌توان این شاخص‌ها را به‌عنوان مناسب‌ترین شاخص‌ها جهت گزینش ژنوتیپ‌های دارای عملکرد مطلوب در شرایط تنش خشکی انتهای فصل در نظر گرفت. بررسی شاخص‌های تحمل به خشکی در برخی از ژنوتیپ‌های پاییزه کلزا نشان داده است که MP، GMP و STI مناسب‌ترین شاخص‌ها جهت گزینش عملکرد دانه می‌باشد (ملکشاهی و همکاران ۲۰۰۹). این یافته‌ها با نتایج دیگر محققان مطابقت داشت (یوسفی ۲۰۱۷ و علی‌اکبری و همکاران ۲۰۱۴). همچنین این محقق با مطالعه تنش خشکی بر روی ارقام کلزا، شاخص MP، GMP و STI برای پیشبرد این استراتژی (گزینش ژنوتیپ‌های با عملکرد دانه بالا در دو شرایط تنش خشکی و غیر تنش) مناسب دانست. بعلاوه، شاخص GMP به‌عنوان مناسب‌ترین شاخص در ارقام گلرنگ نیز گزارش شده است (پورداد و همکاران ۲۰۰۸) زیرا کمترین اثر را از تغییرپذیری محیط می‌گیرد.

همبستگی مثبت و معنی‌دار بین عملکرد دانه با شاخص‌های MP، GMP و STI در شرایط تنش خشکی و غیر تنش وجود دارد و انتخاب بر اساس این شاخص‌ها، عملکرد در شرایط تنش خشکی و غیر تنش را افزایش می‌دهد (عبداللهی و همکاران ۲۰۲۱). وجود رابطه معکوس عملکرد در شرایط تنش با SSI و TOL نشان‌دهنده کاهش حساسیت ارقام به تنش می‌باشد (علی‌اکبری و همکاران ۲۰۱۴). شاخص TOL در شرایط تنش، همبستگی مثبت و معنی‌داری با عملکرد دانه دارد. اما شاخص SSI در شرایط تنش خشکی همبستگی پایینی با عملکرد دانه دارد (شفیقی و همکاران ۲۰۲۱). این نشان می‌دهد که ژنوتیپ‌هایی با پتانسیل عملکرد بالا در شرایط تنش، از کاهش عملکرد بیشتری برخوردارند.

GMP	STI	YSI	MP	TOL	SSI	Ys	Yp	
۱۲۹۱	۰/۸۹۷	۰/۸۸۸	۱۲۹۴	۱۵۳	۰/۶۹	۱۲۱۷	۱۳۷۰	Licord
۱۱۸۲	۰/۷۵۲	۰/۷۵۶	۱۱۹۴	۳۳۲	۱/۵۱	۱۰۲۸	۱۳۶۰	Okapi
۹۹۹	۰/۵۳۷	۰/۷۲۳	۱۰۱۲	۳۲۵	۱/۷۱	۸۵۰	۱۱۷۵	RGS003
۱۲۸۵	۰/۸۸۸	۰/۸۴۵	۱۲۸۹	۲۱۷	۰/۹۶	۱۱۸۱	۱۳۹۷	MRGS9
۱۲۲۷	۰/۸۱۰	۰/۸۱۵	۱۲۳۳	۲۵۱	۱/۱۴	۱۱۰۸	۱۳۵۹	MRGS14
۱۳۵۷	۰/۹۹۱	۰/۹۰۷	۱۳۵۹	۱۳۳	۰/۵۸	۱۲۹۲	۱۴۲۵	MRGS16
۱۳۸۷	۱/۰۳۵	۰/۹۰۷	۱۳۸۹	۱۳۶	۰/۵۸	۱۳۲۱	۱۴۵۷	MRGS31
۱۷۸/۲	۰/۲۰۴	۰/۲۹	۱۵۳/۲	۱۰۳/۳	۰/۲۸	۱۴۲	۱۸۲	Duncan 5%

عملکرد در شرایط بدون تنش (Yp) (کیلوگرم در هکتار)، عملکرد در شرایط تنش (Ys) (کیلوگرم در هکتار)، شاخص حساسیت به تنش (SSI)، شاخص تحمل (TOL)، میانگین بهره‌وری (MP)، شاخص پایداری عملکرد (YSI)، شاخص تحمل تنش (STI)، میانگین هندسی بهره‌وری (GMP)

MP، GMP، STI و YSI بالا و عملکرد در شرایط تنش بالا و از سوی دیگر SSI و TOL پایین دارند. بنابراین انتخاب ژنوتیپ‌هایی با مؤلفه اول بالا و مؤلفه دوم پایین برای هر دو آزمایش آبیاری کامل و قطع آبیاری در مرحله گلدهی مناسب هستند.

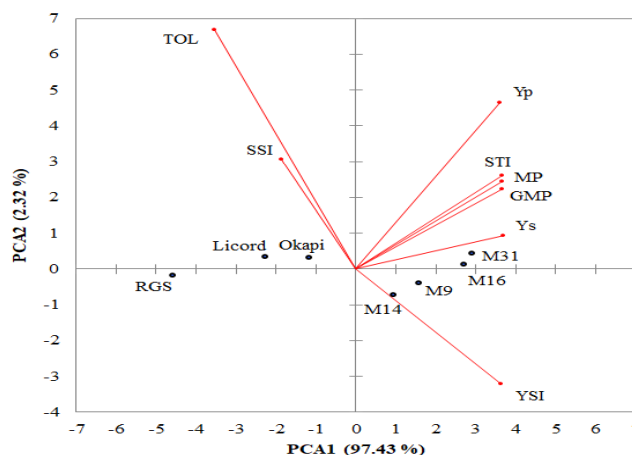
همانطور که در نمودار بای‌پلات^۱ مشخص می‌باشد (شکل ۵) ژنوتیپ‌های موتانت در مجاورت بردارهای مربوط به شاخص‌های مقاومت به خشکی یعنی MP، GMP، STI و YSI قرار گرفتند. همچنین، این ژنوتیپ‌ها و به خصوص ژنوتیپ ام‌آرجی‌اس ۳۱، در مجاورت مؤلفه اول ناحیه‌ای با پتانسیل عملکرد بالا و حساسیت پایین به خشکی قرار دارند. ژنوتیپ‌های لیکورد، اوکاپی و آرجی‌اس در مجاورت بردارهای مربوط به شاخص‌های حساسیت به تنش یعنی SSI و TOL قرار گرفتند که نشان دهنده حساسیت این ارقام به تنش می‌باشد.

نتایج آنالیز PCA نشان داد که دو مؤلفه اول در مجموع ۹۹/۲۳ درصد از کل تغییرات موجود بین داده‌ها را توجیه می‌کنند (جدول ۹). اولین مؤلفه ۹۷/۰۶۱ درصد از تغییرات کل داده‌ها را توجیه می‌کرد و همبستگی مثبت و نسبتاً بالایی با شاخص‌های MP، GMP، STI و YSI و نیز با عملکرد دانه در آزمایش آبیاری کامل و قطع آبیاری در مرحله گلدهی نشان داد (جدول ۸ و ۹). از این رو این مؤلفه می‌تواند به‌عنوان مؤلفه عملکرد بالقوه و تحمل به خشکی معرفی شود. مؤلفه دوم تنها ۲/۸۶۲ درصد از تغییرات کل داده‌ها را توجیه کرد. این مؤلفه با شاخص‌های SSI و TOL همبستگی مثبت و بالایی نشان داد. بنابراین این مؤلفه به‌عنوان مؤلفه حساسیت به تنش در نظر گرفته شد. این مؤلفه قادر به جداسازی ژنوتیپ‌های متحمل به تنش و عملکرد بالا از ژنوتیپ‌های حساس به تنش با عملکرد پایین می‌باشد. در صورتی که میزان مؤلفه دوم پایین باشد، ارقامی انتخاب می‌شوند که

جدول ۹- مقادیر ویژه و سهم نسبی دو مؤلفه اصلی به دست آمده در آنالیز PCA.

مؤلفه	مقادیر ویژه	درصد واریانس	سهم تجمعی (%)
۱	۹/۰۶۱	۱۰/۶۷	۹۷/۰۶۱
۲	۲/۸۶۲	۰/۳۱۵	۹۹/۲۳

¹Biplot



شکل ۵- نمودار بای‌پلات: توزیع ژنوتیپ‌ها در اطراف شاخص‌های تحمل به تنش بر اساس دو مؤلفه اول

کیلوگرم در هکتار)، کمترین کاهش عملکرد (۹/۳۳ درصد) را تجربه کرد. این ژنوتیپ همچنین با دارا بودن وزن هزار دانه (۴/۱۵ گرم) و عملکرد بیولوژیک بالاتر (۷۸۲۱/۵ کیلوگرم در هکتار)، برتری خود را نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها تثبیت نمود. ژنوتیپ‌های موتانت در مجاورت بردارهای مربوط به شاخص‌های مقاومت به خشکی یعنی MP، GMP، STI و YSI قرار گرفتند. این ژنوتیپ‌ها و به خصوص ژنوتیپ ام‌آرجی‌اس ۳۱، در مجاورت مؤلفه اول ناحیه‌ای با پتانسیل عملکرد بالا و حساسیت پایین به تنش خشکی قرار دارند و بنابراین در شرایط تنش خشکی انتهای فصل بسیار مناسب‌تر از ژنوتیپ‌های شاهد دیده شدند. ژنوتیپ‌های لیکورد، اوکاپی و آرجی‌اس در مجاورت بردارهای مربوط به شاخص‌های حساسیت به تنش یعنی SSI و TOL قرار گرفتند که نشان دهنده حساسیت این ارقام به تنش می‌باشد. با توجه به اینکه موتانت‌های کلزا در هر دوشرایط آبیاری کامل و قطع آبیاری در مرحله گلدهی دارای عملکرد بالاتری نسبت به تیمار شاهد داشتند (ام‌آرجی‌اس ۳۱ به ترتیب با ۱۴۵۷ و ۱۳۲۱ نسبت به ژنوتیپ آرجی‌اس به ترتیب ۱۱۷۴/۶ و ۸۴۹/۶۶ کیلوگرم در هکتار) می‌توان نتیجه گرفت که اشعه گاما به خوبی توانسته اثر مثبتی روی مقاومت گیاه در برابر تنش خشکی بگذارد. به طور کلی، ژنوتیپ ام‌آرجی‌اس ۳۱ با کاهش عملکرد ناچیز (۹/۳۳ درصد) تحت شرایط تنش خشکی و برتری در شاخص‌های مقاومت به خشکی، اثربخشی موتاسیون با اشعه گاما در ایجاد

بر این اساس، رقم آرجی‌اس حساس‌ترین رقم به تنش خشکی در این پژوهش گزارش می‌گردد. بعلاوه، شاخص TOL ژنوتیپ‌هایی را که در شرایط تنش کاهش عملکرد داشته باشند، گزینش می‌کند. بنابراین ژنوتیپ‌های شناسایی شده توسط این شاخص عملکرد بالقوه پایینی خواهند داشت. از این شاخص (TOL) می‌توان برای ارزیابی نهایی ارقامی که توسط سایر شاخص‌ها گزینش شده‌اند استفاده نمود (فرناندز ۱۹۹۲). نتایج بدست آمده از بای‌پلات تاییدی بر نتایج حاصل از همبستگی بین شاخص‌ها می‌باشد. ژنوتیپ‌هایی با مؤلفه اول بالا و مؤلفه دوم پایین عملکرد بالایی داشته و ژنوتیپ‌های پایدار می‌باشند و ژنوتیپ‌های با مؤلفه اول پایین و مؤلفه دوم بالا عملکرد پایین داشته و ژنوتیپ‌های غیرپایدار به شمار می‌آیند (یارنیا و همکاران ۲۰۱۱). همان‌طور که نشان داده شد، استفاده از نمودار بای‌پلات امکان گزینش ژنوتیپ‌های با عملکرد بالا و متحمل به خشکی را از طریق استفاده از چند شاخص یا صفت متفاوت فراهم نمود.

نتیجه گیری

نتایج این پژوهش به وضوح تحمل به تنش خشکی در موتانت‌ها را در مقایسه با شاهد نشان داد. ژنوتیپ ام‌آرجی‌اس ۳۱ به عنوان برترین ژنوتیپ، در شرایط آبیاری کامل (با عملکرد دانه ۱۴۵۷ کیلوگرم در هکتار) و قطع آبیاری در مرحله گلدهی (با عملکرد دانه ۱۳۲۱

ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی با عملکرد پایدار را تأیید می‌کند. ادغام این موتانت ها در برنامه‌های اصلاحی، همراه با بررسی مکانیسم‌های مولکولی تحمل به خشکی، راهبردی کلیدی برای توسعه ارقام پایدار و سازگار با تغییرات اقلیمی در مناطق خشک ایران است.

سپاسگزاری

بدین وسیله از همکاری و مساعدت پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کشاورزی هسته‌ای کرج تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع مورد استفاده

- Abdollahi AH, Sofalian O, Alizadeh B, Asghari A and Zali H. 2021. Investigation of frost stress tolerance in some promising rapeseed genotypes. *Agricultural Science and Sustainable Production*, 31(2): 270-288. (In Persian) doi. 10.22034/SAPS.2021.13109
- Aktas H. 2016. Drought tolerance indices of selected landraces and bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes derived from synthetic wheats. *Applied Ecology and Environmental Research*, 14(4): 177-189. doi:10.15666/aeer/1404_177189
- Aliakbari M, Razi H and Kazemeini S. 2014. Evaluation of drought tolerance in rapeseed (*Brassica napus* L.) cultivars using drought tolerance indices. *International journal of Advanced Biological and Biomedical Research*, 2(3): 696-705.
- Bakhshi B, Amiri Oghan H, Rameeh V, Fanaei HF, Askari AH, Faraji A, Ghodrati GH, Zeinalzadeh Tabrizi H, Payghamzadeh K, Kiani D, Sadeghi H, Kazerani NK, Danaei AK, Dalili A, Aghajani Nasab M and Afrouzi A. 2023. Analysis of genotype by environment interaction to identify high-yielding and stable oilseed rape genotypes using the GGE-biplot model. *Ecological Genetics and Genomics*, 28: 100187. doi.org/10.1016/j.egg.2023.100187
- Bennett EJ, Roberts JA and Wagstaff C. 2011. The role of the pod in seed development: strategies for manipulating yield. *New Phytologist*, 190: 838-853. doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03714.x
- Bijani M, Soufizadeh S, Shiranirad AH and Jabbari H. 2023. Evaluation of Spring Oilseed rape cultivars response to terminal drought stress in Karaj. *Journal of Crops Improvement*, 25 (4), 919-933. doi.org/10.22059/jci.2022.347418.2740
- Bitarafan Z and Shirani Rad AH. 2012. Water stress effect on spring rapeseed cultivars yield and yield components in winter planting. *International Journal of the Physical Sciences*, 7(19): 2755-2767. doi:10.5897/IJPS12.221
- Bouslama M and Schapaugh WT. 1984. Stress tolerance in soybean. Part 1: evaluation of three screening techniques for heat and drought tolerance. *Journal of Crop Science*, 24: 933-937. doi.org/10.2135/cropsci1984.0011183X002400050026x
- Cohen AC, Travaglia CN, Bottini R and Piccoli PN. 2009. Participation of abscisic acid and gibberellins produced by endophytic *Azospirillum* in the alleviation of drought effects in maize. *Botanique*, 87: 455-462. doi:10.1139/B09-023
- Daneshmand AR, Shirani-Rad AH, Nourmohammadi GH, Zareei GH and Daneshian J. 2008. Effect of irrigation regimes and nitrogen levels on seed yield and seed quality of two rapeseed (*Brassica napus* L.) cultivars. *Iranian Journal of Crop Science*, 10 (3): 244-261. [In Persian] URL: <http://agrobreedjournal.ir/article-1-231-fa.html>
- Davami P, Alavi Fazel M, Habibi D and Mozaffari A. 2021. Effect of terminal drought stress on seed yield and its components of rapeseed cultivars. *Journal of Crop Nutrition Science*, 7(1): 42-56. (In Persian) doi:10.1016/j.indcrop.2018.01.082
- EL Sabagh A, Hossain A, Barutcular C and Sohikul Islam MS. 2019. Drought and salinity stress management for higher and sustainable canola (*Brassica napus* L.) production: A critical review. *Australian Journal of Crop Science*, 13(1): 88-96. doi:10.21475/ajcs.19.13.01.p1284

- Elferjani R and Soolanayakanahall R. 2018. Canola responses to drought, heat, and combined stress: Shared and specific effects on carbon assimilation, seed yield, and oil composition. *Frontiers in Plant Science*, 9: 1-17. doi.org/10.3389/fpls.2018.01224
- Faraji A, Lattifi N, Solatni A and Shirani Rad AH. 2009. Seed yield and water use efficiency of canola as affected by high temperature stress and supplemental irrigation. *Agricultural Water Management*, 96: 132-140 doi.org/10.1016/j.agwat.2008.07.014.
- Fernandez GC. 1992. Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance. *Proceeding of the International Symposium on Adaptation of Vegetable and other Food Crops to Temperature and Water Stress*. Taiwan, 13-18 August, PP. 257-270. doi.org/10.22001/wvc.72511
- Fischer RA and Maurer R. 1978. Drought resistance in spring wheat cultivars. Part 1: grain yield response. *Australian Journal of Agriculture Research*, 29(4): 897- 912. doi.org/10.1071/AR9780897
- Foroughi A, Biabani A, Rahemi AK and Rasam Gh. 2019. Evaluation of adaptation of different varieties of Canola (*Brassica napus* L.) under the climatic conditions of Shirvan. *Journal of crop Production*, 12(2): 33-56. [In Persian] doi: 10.22069/ejcp.2019.13113.2016
- Hakan-ozler EO and Unsal D. 1999. Relationships between yield and yield components on currently improved spring rapeseed cultivars. *Teor. Journal of Agriculture Fores*, 23: 603- 607. <https://journals.tubitak.gov.tr/agriculture/vol23/iss6/6>
- Hamzei J and Soltani J. 2012. Deficit irrigation of rapeseed for water-saving: Effects on biomass accumulation, light interception and radiation use efficiency under different N rates. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 155: 153–160. doi.org/10.1016/j.agee.2012.04.003
- Hasanuzzaman M, Nahar K, Khan MIR, Al Mahmud J, Alam MM and Fujita M. 2020. Regulation of reactive oxygen species metabolism and glyoxalase systems by exogenous osmolytes confers thermotolerance in *Brassica napus*. *Gesunde Pflanz*, 72: 3-16. doi:10.1007/s10343-019-00476-4
- Hua W, Li RJ, Zhan GM, Liu J, Li J, Wang XF, Liu GH and Wang HZ. 2012. Maternal control of seed oil content in *Brassica napus*: the role of silique wall photosynthesis. *Plant Journal*, 69: 432-444. doi.org/10.1111/j.1365-313X.2011.04802.x
- Jamshidi N, Shirani-rad AH, Takht chin F, Nazeri P and Ghafari M. 2012. Evaluation of rapeseed genotypes under drought stress condition. *Journal of Crop Ecophysiology*, 6(23): 323-338. (In Persian) URL: <https://sanad.iau.ir/Journal/jcep/Article/956659>
- Joshi NL, Mali PC and Sexena A. 1998. Effect of nitrogen and sulphur application on yield and fatty acid composition of mustard (*Brassica juncea* L.) Oil. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 180(1): 59-63. doi:10.1111/j.1439-037X.1998.tb00370.x
- Khoshnam M. 2007. Effect of planting spacings on critical period of weed control in canola. MSc Thesis of Agronomy, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan. (In Persian)
- Liang D, Ni Z, Xia H, Xie Y, Lv X, Wang J, Lin L, Deng Q and Luo X. 2019. Exogenous melatonin promotes biomass accumulation and photosynthesis of kiwifruit seedlings under drought stress. *Scientia Horticulturae*, 246: 34–43. doi: 10.7717/peerj.7793
- Majidi MM, Jafarzadeh-Ghahdrijani M, Rashidi F and Mirlohi A. 2015. Identification of canola cultivars with drought tolerance indices. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 45(4): 565-573. (In Persian) URL: https://ijfcs.ut.ac.ir/article_53566_7016.html
- Malekshahi F, Dehghani H and Alizadeh B. 2009. A study of drought tolerance indices in Canola (*Brassica napus* L.) genotypes. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Research*, 13: 77-90. URL: <http://jstnar.iut.ac.ir/>
- Masoud Sinaki J, Madjidi Heravan E and Shirani Rad AH. 2007. The effects of water deficit during growth stages of canola (*Brassica napus* L.). *Journal of Agricultural and Environmental Science*, 2(4): 417-422. URL: [https://www.idosi.org/aejaes/jaes2\(4\)/17.pdf](https://www.idosi.org/aejaes/jaes2(4)/17.pdf)

- Mhamdi A and Breusegem VF. 2018. Reactive oxygen species in plant development. *Development*, 145: 1-12. doi: 10.1242/dev.164376
- Monajem S, Mohammadi V and Ahmadi A. 2011. Evaluation of drought tolerance in some rapeseed cultivars based on stress evaluation indices. *Elec. Journal of Crop Production*, 4(1): 151-169. URL: <https://ejcp.gau.ac.ir/>
- Naderi Arefi A and Abedini Esfahlani M. 2013. Effect of planting date on yield and yield components of spring and winter canola cultivars. *Agronomy Journal*, 104: 167-171. doi:10.22092/AJ.2014.103372
- Naserian-Khiabani, B. and Alizadeh, B. 2018. Evaluation of grain yield stability in rapeseed (*Brassica napus* L.) mutant lines using GGE biplot. *Journal of nuclear Science and Technology*, 83(1), PP.96-102. (In Persian) doi.org/10.24200/nst.2018.196
- Noori SAS, Khalaj AH, Rad I, Alahdadi GA, Akbari M and Abadi R. 2007. Investigation of seed vigor and germination of canola cultivars under less irrigation in padding stage and after it. *Pakistan Journal of Biology Science*, 10(17): 2880-2884. doi: 10.3923/pjbs.2007.2880.2884
- Nour MM, Aljabi HR, AL-Huqail AA, Horneburg B, Mohammed AE and Alotaibi MO. 2024. Drought responses and adaptation in plants differing in life-form. *Frontiers in Ecology and Evolution*. 12:1452427. doi: 10.3389/fevo.2024.1452427
- Panda SK, Gupta D, Patel M, Vyver CVD and Koyama H. 2024. Functionality of Reactive Oxygen Species (ROS) in Plants: Toxicity and Control in Poaceae Crops Exposed to Abiotic Stress. *Plants*, 13(15): 2071. doi.org/10.3390/plants13152071
- Pasban Eslam B, Monirifar H and Sadeghi Bakhtavari AR. 2017. Morpho-physiological response of rapeseed (*Brassica napus* L.) genotypes to drought stress. *Crop Breeding Journal*, 7 (1 & 2): 49-56. doi: 10.22092/cbj.2018.116331.1019
- Pourdad SS, Alizadeh Kh, Azizinegad R, Shariati A, Eskandari M, Khiavi M and Nabatee E. 2008. Study on drought resistance in spring safflower (*Carthamus tinctorius* L.) in different locations. *Journal of Water and Soil Science*, 12(45): 403-415. (In Persian) URL: <http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-929-fa.html>
- Rashidi S, Shirani Rad AM, Ayene Band A, Javidfar F and Lak SH. 2012. Study of relationship between drought stresses tolerances with some physiological parameters in canola genotypes (*Brassica napus* L.). *Annals of Biological Research*, 3: 564-569. doi: 10.5555/20123071481
- Raza MAS, Shahid AM, Saleem MF, Khan IH, Ahmad S, Ali M and Iqbal R. 2017. Effects and management strategies to mitigate drought stress in oilseed rape (*Brassica napus* L.): a review. *Zemdirbyste-Agriculture*, 104: 85-94.
- Rosielle AA and Hamblin J. 1987. Theoretical aspects of selection for yield in stress and non-stress environments. *Crop Science*, 21: 943-946. URL: https://srv2.freepaper.me/n/no_fg727jmX57BOMfCcZ_w/PDF
- Sachdev S, Ansari, SA, Ansari MI, Fujita M and Hasanuzzaman M. 2021. Abiotic stress and reactive oxygen species: generation, signaling, and defense mechanisms. *Antioxidants*, 10: 277-314. doi.org/10.3390/antiox10020277
- Safari MR, Dadashi MR, Faraji A and Armin M. 2023. Effect of biofertilizer and drought stress on quantitative and qualitative traits in some winter rapeseed (*Brassica napus* L.). *Romanian Agricultural research*, 40: 403-515. URL: <https://www.incda-fundulea.ro/rar/nr40fol/rar40.58.pdf>
- Safavi Fard N, Heidari Sharif Abad H, Shirani Rad AH, Majidi Hervan E and Daneshian J. 2018. Effect of drought stress on qualitative characteristics of canola cultivars in winter cultivation. *Industrial Crops & Products*, 114: 87-92. doi:10.1016/j.indcrop.2018.01.082
- Sehgal A, Sita K, Bhandari K, Kumar S, Kumar J, Vara Prasad PV, Siddique KH and Nayyar H. 2019. Influence of drought and heat stress, applied independently or in combination during seed development, on qualitative and quantitative aspects of seeds of lentil (*Lens culinaris* Medikus) genotypes, differing in drought sensitivity. *Plant Cell Environ*, 42: 198-211. doi: 10.1111/pce.13328

- Seleiman MF, Al-Suhaibani N, Ali N, Akmal M, Alotaibi M, Refay Y, Dindaroglu T, Abdul-Wajid HH and Battaglia ML. 2021. Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. *Plants (Basel)*. 10(2):259. doi: 10.3390/plants10020259.
- Shafighi A, Ardakani MR, Shirani-Rad AH, Alavi Fazel M and Rafiei F. 2021. Identification of tolerant rapeseed (*Brassica napus* L.) cultivars to drought tolerance indices under late sowing date. *Journal of Crop Ecophysiology*, 15(1): 73-90. doi: 10.30495/jcep.2021.681007
- Sharghi Y, Shirani Rad AH, Ayeneh Band A, Noormohammadi Gh and Zahedi H. 2011. Yield and yield components of six canola (*Brassica napus* L.) cultivars affected by planting date and water deficit stress. *African Journal of Biotechnology*, 10(46): 9309-9313. doi:10.5897/AJB11.048
- Shirani-Rad AH and Zandi P. 2014. Agronomic evaluation of rapeseed varieties (*Brassica napus* L.) in response to late-season water deficit stress. *Agriculture Conspectus Scientificus*, 79(3): 157-165. URL: <https://hrcak.srce.hr/129644>
- Soleymani A, Moradi M and Naranjani L. 2011. Effects of the irrigation cut-off time in different growth stages on grain and oil yield components of autumn's canola cultivars in Isfahan region. *Journal of water and Soil*, 25(3): 426-435. (In Persian) doi: 10.22067/JSW.V0I0.9623
- Sylvester-Bradley R. 1985. Revision of a code for stage of development in oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Aspects of Applied Biology*, 10: 395-400.
- Taiwo AF, Daramola O, Sow M and Semwal VK. 2020. Ecophysiology and responses of plants under drought. *Plant ecophysiology and adaptation under climate change: mechanisms and perspectives I*. Springer, P. 231-268. doi.org/10.1007/978-981-15-2156-0_8
- Tohidi-Moghaddam HR, Zahedi H and Ghoooschi F. 2011. Oil quality of canola cultivars in response to water stress and super absorbent polymer application. *Pesquisa Agropecuária Tropical (Agricultural Research in the Tropics)*, 41(4): 579-586. doi.org/10.5216/pat.v41i4.13366
- Yadollahi MT, Tavakoli MR and Marjani A. 2016. Investigating the compatibility and determining the best planting date for four varieties of canola oilseed in Maneh and Samolghan climatic conditions. 6th National Symposium on Sustainable Agriculture and Natural Resources, Tehran, Iran. (In Persian)
- Yarnia M, Arabifard N, Rahimzadeh Khoei F and Zandi P. 2011. Evaluation of drought tolerance indices among some winter rapeseed cultivars. *African Journal of Biotechnology*, 10(53): 10914-10922. doi:10.5897/AJB11.1748
- Yildiz M, Akçali N and Terzi H. 2015. Proteomic and biochemical responses of canola (*Brassica napus* L.) exposed to salinity stress and exogenous lipoic acid. *Journal of Plant Physiology*, 179: 90-99. doi.org/10.1016/j.jplph.2015.03.006
- Youssefi A. 2017. Assessing indices of drought resistance in three species of canola (*Brassica* spp.) under restricted irrigation. *Journal of Environmental Stresses in Crop Science*, 10(2): 257-267. doi.org/10.22077/escs.2017.582
- Zabet M, Seddigh S and Samadzade A. 2016. The effect of drought stress on yield and yield components in 10 genotypes of rapeseed under Birjand climate conditions. *Journal of Environmental Stresses in Crop Science*, 9(2): 121-137. (In Persian) doi.org/10.22077/escs.2016.359
- Zali H, Hasanloo T, Sofalian O and Asghari A. 2020. Evaluation of drought stress effect on seed oil yield and fatty acid composition in canola (*Brassica napus* L.) cultivars. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 13(3): 733-747. doi.org/10.22077/escs.2020.2205.1552
- Zarei G, Shamsi H and Dehghani SM. 2010. The effect of drought stress on yield, yield components and seed oil content of three autumnal rapeseed cultivars (*Brassica napus* L.). *Journal of Research in Agricultural Science*, 6(1): 29-36. (In Persian) <http://www.jras.ir>
- Zhang HH, Xu N, Teng ZY, Wang JR, Ma S, Wu X, Li X and Sun GY. 2019. 2-Cys Prx plays a critical role in scavenging H₂O₂ and protecting photosynthetic function in leaves of tobacco seedlings under drought

stress. Journal of Plant-Environment Interactions, 141: 119–128.
doi.org/10.1080/17429145.2018.1562111

Zirgoli MH and Kahrizi D. 2015. Effects of end-season drought stress on yield and yield components of rapeseed (*Brassica napus* L.) in warm regions of Kermanshah Province. Biharean Biologist, 9(2): 133-140. URL: <http://biozoojournals.ro/bihbiol/index.html>