



## Evaluation of the Effect of Foliar Application of Brassinosteroid on Physiological Characteristics and Yield of Rapeseed Genotypes Under Late-Season Drought Stress

Shahryar Kazemi<sup>1</sup> | Mahsa Rafati Alashti<sup>2</sup> | Ghorban Khodabin<sup>3</sup>

1. Department of Agricultural Sciences, Payame Noor University, Tehran, Iran. E-mail: [Sh.kazemi@pnu.ac.ir](mailto:Sh.kazemi@pnu.ac.ir)
2. Department of Agricultural Sciences, Payame Noor University, Tehran, Iran. E-mail: [m.alashti@pnu.ac.ir](mailto:m.alashti@pnu.ac.ir)
2. Corresponding Author, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. E-mail: [G.khodabin@modares.ac.ir](mailto:G.khodabin@modares.ac.ir)

### Article Info

#### Article type:

Research Article

#### Article history:

Received: February 04, 2022

Received in revised form:

July 05, 2022

Accepted: July 31, 2022

Published online: April 16, 2023

#### Keywords:

Brassinosteroid,  
drought stress,  
oil percentage,  
oil seed,  
relative water content.

### ABSTRACT

In order to study the effect of brassinosteroids on yield and physiological characteristics of rapeseed genotypes under late-season drought stress, a factorial split-plot test is conducted in a randomized complete blocks design with three replicates for two cultivation years (2017-2019) in the research farm of Islamic Azad University, Karaj (Mahdasht). Experimental treatments include two levels of brassinosteroid (0 (the control) and 0.1  $\mu\text{mol}$ ) and two levels of irrigation (full irrigation (the control) and withholding irrigation from 50% flowering stage) as factorial in the main plots, with rapeseed genotypes (Nafis, Ahmadi, Okapi, Nima, and Niloofar) being considered as subplots. Foliar application of brassinosteroid under both full irrigation and withholding irrigation from the flowering stage increase seed yield, chlorophyll, and relative water content, compared to the control. The highest amount of soluble carbohydrates, leaf proline, and oil percentage have been obtained under drought stress and brassinosteroid application, i.e. 24.8%, 16.5%, and 2.5%, respectively, compared to the control conditions. However, Okapi genotype has had the highest stomatal resistance (24.59 s/cm), the lowest chlorophyll (1.49  $\mu\text{molg}^{-1}\text{FW}$ ), and seed yield (1960.5 kg/ha) in the conditions of withholding irrigation. Niloufar genotype has had the lowest stomatal resistance, the highest chlorophyll, oil percentage, and seed yield in both irrigation conditions. In general, in both irrigation treatments, the use of brassinosteroids improve physiological traits of rapeseed.

**Cite this article:** Kazemi, Sh., Rafati Alashti, M., & Khodabin, Gh. (2023). Evaluation of the Effect of Foliar Application of Brassinosteroid on Physiological Characteristics and Yield of Rapeseed Genotypes Under Late-Season Drought Stress. *Journal of Crops Improvement*, 24 (4), 111-126. DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2022.338528.2676>





## بررسی تأثیر محلول پاشی بر اسینواستروئید بر برخی صفات فیزیولوژیکی و عملکرد ژنوتیپ‌های کلزا تحت شرایط تنش خشکی انتهای فصل

شهریار کاظمی<sup>۱</sup> | مهسا رفعتی آلاشتی<sup>۲</sup> | قربان خدابین<sup>۳</sup> ✉

۱. گروه علوم کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران. رایانامه: [Sh.kazemi@pnu.ac.ir](mailto:Sh.kazemi@pnu.ac.ir)

۲. گروه علوم کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران. رایانامه: [m.alashti@pnu.ac.ir](mailto:m.alashti@pnu.ac.ir)

۳. نویسنده مسئول، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: [G.khodabin@modares.ac.ir](mailto:G.khodabin@modares.ac.ir)

### اطلاعات مقاله

### چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۴/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۰۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۱/۲۷

### کلیدواژه‌ها:

براسینواستروئید،

تنش خشکی،

دانه روغنی،

درصد روغن،

محتوای نسبی آب.

به منظور بررسی اثر براسینواستروئید بر عملکرد و صفات فیزیولوژیکی ارقام مختلف کلزا تحت تنش خشکی آخر فصل، آزمایشی به صورت فاکتوریل کرت خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار طی دو سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶ و ۹۸-۱۳۹۷ در مزرعه پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج (ماهدشت) اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل محلول پاشی براسینواستروئید (صفر و ۰/۱ میکرومولار) و آبیاری (معمول و قطع آبیاری از مرحله ۵۰ درصد گلدهی) به صورت فاکتوریل در کرت‌های اصلی و ژنوتیپ‌های کلزا (نفیس، احمدی، اکاپی، نیما و نیلوفر) در کرت‌های فرعی قرار گرفتند. محلول پاشی براسینواستروئید در هر دو شرایط آبیاری کامل و قطع آبیاری موجب افزایش عملکرد دانه، کلروفیل و محتوای نسبی آب نسبت به شاهد شد. بالاترین مقدار کربوهیدرات محلول، پرولین برگ و درصد روغن در شرایط تنش خشکی و کاربرد براسینواستروئید حاصل شد که نسبت به شرایط کنترل به ترتیب ۲۴/۸، ۱۶/۵ و ۲/۵ درصد بیش تر بود. این در حالی بود که رقم اکاپی در شرایط قطع آبیاری بالاترین مقاومت روزنه‌ای (۲۴/۵۹ ثانیه بر سانتی‌متر)، کمترین میزان کلروفیل (۱/۴۹ میکرومول در گرم وزن تر) و عملکرد دانه (۱۹۶۰/۵ کیلوگرم در هکتار) را دارا بود. رقم نیلوفر کمترین میزان مقاومت روزنه‌ای و بالاترین میزان کلروفیل، درصد روغن و عملکرد دانه را در هر دو شرایط آبیاری داشت. به طور کلی در هر دو تیمار آبیاری، کاربرد براسینواستروئید منجر به بهبود صفات فیزیولوژیک کلزا شد.

**استناد:** کاظمی، ش.، رفعتی آلاشتی، م. و خدابین، ق. (۱۴۰۲). بررسی تأثیر محلول پاشی براسینواستروئید بر برخی صفات فیزیولوژیکی و عملکرد ژنوتیپ‌های کلزا تحت شرایط تنش خشکی انتهای فصل. *به زراعی کشاورزی*، ۲۵ (۱)، ۱۱۱-۱۲۶.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2022.338528.2676>



## ۱. مقدمه

کلزا (*Brassica napus* L.) دومین محصول مهم دانه روغنی در جهان است (Rathnakumar & Sujatha, 2022). که به دلیل کیفیت بالای روغن با حداقل اسید اروسیک و گلوکوزینولات، نقطه عطفی در تولید روغن خوراکی به‌شمار می‌آید (Qian et al., 2018). از دهه ۱۹۷۰، تولید کلزا به دلیل رشد جمعیت، مصارف خوراکی و همچنین نیاز به انرژی‌های تجدیدپذیر دو برابر شده است (FAO, 2015). همچنین این گیاه به‌عنوان یک محصول جایگزین برای تناوب زراعی مبتنی بر غلات، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران استفاده می‌شود (Hamzei & Soltani, 2012). اهداف اصلی در بهبود محصولات دانه‌های روغنی، افزایش عملکرد دانه و روغن، کیفیت روغن برای مصارف خوراکی و صنعتی و همچنین توسعه وارته‌هایی متناسب با سیستم‌های مختلف زراعی دارای مقاومت یا تحمل به تنش‌های زیستی و غیر زیستی است (Rathnakumar & Sujatha, 2022).

تنش خشکی بر بسیاری از جنبه‌های رشد گیاه مؤثر است و موجب تغییرات مورفولوژیکی در ساختار گیاه می‌شود و با تأثیر بر فرایندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی از قبیل فتوسنتز، تنفس، متابولیسم عناصر غذایی و جذب، تراوایی غشاهای سلولی و پایداری آن‌ها، روابط آبی گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Salehi-Lisar et al., 2016; Rashtbari et al., 2020). پاسخ گیاه به تنش خشکی بسیار پیچیده است و به عوامل متعددی از جمله شدت و مدت تنش خشکی و مرحله رشد گیاه، پتانسیل ژنتیکی گیاه و عوامل محیطی بستگی دارد (Anjum et al., 2016). کمبود آب در مرحله گلدهی، که حساس‌ترین مرحله رشدونمو کلزا به کمبود آب است، سبب افت قابل توجه تعداد دانه و وزن هزاردانه شد و کمیت و کیفیت روغن دانه را نیز کاهش داد (Khodabin et al., 2021). گزارش شده است که تنش خشکی آخر فصل موجب افزایش مقاومت روزنه‌ای، پرولین برگ و کاهش مقدار کلروفیل کل و محتوای نسبی آب برگ در ارقام کلزا شد (Khayat Moghadam et al., 2021a). کاهش محسوس عملکرد روغن در شش رقم کلزا در شرایط قطع آبیاری از گلدهی به بعد گزارش شده است (Sharghi et al., 2011). در بررسی دیگر نیز تنش خشکی آخر فصل سبب افت عملکرد روغن در ۲۲ رقم کلزای پاییزه شد (Rashidi et al., 2017).

چندین روش زراعی و فیزیولوژیکی جهت کاهش اثرات نامطلوب تنش خشکی و القای تحمل به تنش خشکی در گیاهان به‌کار گرفته شده است. استفاده از هورمون‌های گیاهی یکی از راه‌کارهای نویدبخش و کاربردی برای افزایش بهره‌وری محصول در شرایط تنش است (Chen et al., 2018). شواهد نشان می‌دهد که تنظیم‌کننده‌های رشد به‌طور برون‌زا می‌توانند تحمل به تنش‌های مختلف مانند خشکی، فلزات سنگین و شوری را در گیاهان بهبود بخشند (Anjum et al., 2018; Tanveer et al., 2018). براسینواستروئیدها هورمون‌های گیاهی طبیعی را تشکیل می‌دهند که در تنظیم عملکردهای متابولیکی مختلف مرتبط با فرایندهای مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و رشدی گیاهان نقش دارند (Sidhu & bali, 2022) و باعث ایجاد مقاومت در برابر تنش‌های غیر زیستی در گیاهان مختلف می‌شود (Xia et al., 2011; Vardhini et al., 2009). پژوهش‌ها نشان داده است که مصرف براسینواستروئیدها در افزایش فعالیت کاتالاز و محتوای پرولین مؤثر بوده و می‌تواند تحمل کلزا را در برابر تنش خشکی افزایش دهد و از قرارگرفتن در شرایط بحرانی نجات دهد (Saffari et al., 2014). محلول پاشی براسینواستروئید با کاهش تعرق منجر به بهبود کارایی مصرف آب شد و توانست تعادل یونی را با افزایش جذب  $K^+$  و  $Ca^{+2}$  و کاهش محتوای  $Na^+$  در برگ‌های ذرت تنظیم کند (El-El, 2009). همچنین گزارش شده است که کاربرد براسینواستروئید باعث افزایش کلروفیل a و b و کل در لوبیاچیتی (Lima & Lobato, 2017) و عملکرد دانه شد (Anjum et al., 2011; Gruszka, 2020).

پژوهش حاضر در راستای نیل به اهدافی هم‌چون بررسی نقش براسینواستروئید به‌عنوان یک شبه‌هورمون در کاهش

خسارت‌های ناشی از تنش خشکی و تعیین ژنوتیپ مناسب در منطقه کرج بر صفات فیزیولوژیکی و عملکرد ژنوتیپ‌های کلزا صورت گرفت.

## ۲. مواد و روش‌ها

به‌منظور ارزیابی پاسخ ژنوتیپ‌های کلزا به براسینواستروئید در شرایط تنش خشکی، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل کرت خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار طی دو سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶ و ۹۸-۱۳۹۷ در مزرعه پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج (ماه‌دشت) با موقعیت ۳۷ درجه و ۴۵ دقیقه عرض شمالی و ۵۶ درجه و ۵۵ دقیقه طول شرقی اجرا شد. آمار داده‌های هواشناسی محل آزمایش در طی دو سال زراعی در جدول (۱) ارائه شده است.

مشخصات خاک محل آزمایش در جدول (۲) ارائه شده است. در این آزمایش عامل آبیاری در دو سطح شامل آبیاری معمول (شاهد) و قطع آبیاری از مرحله ۵۰ درصد گلدهی (سیستم کدبندی BBCH کد شماره ۶۵) و عامل براسینواستروئید (نوع ۲۴-پی براسینولید) (EBR, Sigma-Aldrich, USA) در دو غلظت صفر و ۰/۱ میکرومولار (Ahammed *et al.*, 2012; Shu *et al.*, 2016) به‌صورت فاکتوریل به‌عنوان کرت اصلی و ژنوتیپ‌های کلزا (جدول ۲) شامل نفیس، احمدی، اکاپی، نیما و نیلوفر در کرت‌های فرعی قرار گرفتند.

زمان کاشت در هر دو سال زراعی در تاریخ ۱۰ مهرماه ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷ بود. به‌منظور آماده‌سازی زمین، قبل از اجرای آزمایش، زمین موردنظر آبیاری گردید و پس از گاو رو شدن به‌وسیله گاوآهن برگردان‌دار شخم و سپس دیسک و تسطیح شد. هر کرت آزمایشی، شامل شش ردیف کاشت به طول شش متر بافاصله ۳۰ سانتی‌متر بود که دو ردیف کناری به‌عنوان حاشیه در نظر گرفته شدند. فاصله بین کرت‌های اصلی ۱۸۰ سانتی‌متر، فاصله بین کرت‌های فرعی ۶۰ سانتی‌متر و فاصله بین تکرارها سه متر بود. فاصله بوته‌ها روی ردیف‌های کاشت نیز چهار سانتی‌متر در نظر گرفته شد. کودهای مصرفی براساس نتایج آزمون خاک (جدول ۳) عبارت بودند از ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار فسفر (از منبع فسفات آمونیوم) و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار پتاسیم (از منبع سولفات پتاسیم) به‌صورت هم‌زمان با آماده‌سازی بستر بذر، ۳۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن (از منبع اوره؛ ۱۰۰ کیلوگرم در مرحله کاشت، ۱۵۰ کیلوگرم در مرحله ساقه‌دهی و ۱۰۰ کیلوگرم در مرحله غنچه‌دهی) به‌صورت سرک به خاک افزوده شدند.

جدول ۱. میانگین دما و بارندگی ایستگاه هواشناسی منطقه کرج در سال‌های زراعی ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷

ماه	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر
سال	۹۶	۹۶	۹۶	۹۶	۹۶	۹۶	۹۷	۹۷	۹۷	۹۷
بارش (mm)	۰	۴/۸	۰/۶	۵/۱	۱۹/۸	۳۱/۱	۱۴/۱	۱۸/۵	۲۱	۷/۱
میانگین دما	۲۲/۳	۱۶	۱۰/۵	۶/۲	۴	۶/۸	۱۳/۹	۱۳/۶	۱۸/۷	۲۶/۱
ماه	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر
سال	۹۷	۹۷	۹۷	۹۷	۹۷	۹۷	۹۸	۹۸	۹۸	۹۸
بارش (mm)	۰/۷	۳۰/۱	۶۴/۸	۳۳/۹	۵۸/۹	۱۲/۵	۴۹/۷	۲۵/۶	۱۳	۰
میانگین دما	۲۲/۸	۱۶/۲	۹	۷/۳	۴/۸	۵/۸	۹/۲	۱۴/۸	۲۱/۴	۲۶/۹

جدول ۲. مشخصات ارقام موردبررسی

نام تجاری رقم	سازگاری	نوع ژنوتیپ	منشأ	تیپ رشد	نوع کیفی
اکاپی	اقلیم سرد و معتدل سرد	آزادگرده‌افشان	فرانسه	زمستانه	Canola (00)
احمدی	اقلیم سرد و معتدل سرد	آزادگرده‌افشان	ایران	زمستانه	Canola (00)
نفیس	اقلیم سرد و معتدل سرد	آزادگرده‌افشان	ایران	زمستانه	Canola (00)
نیما	اقلیم سرد و معتدل سرد	آزادگرده‌افشان	ایران	زمستانه	Canola (00)
نیلوفر	اقلیم سرد و معتدل سرد	آزادگرده‌افشان	ایران	زمستانه	Canola (00)

جدول ۳. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش در عمق‌های ۰-۳۰ و ۰-۶۰ و ۳۰ سانتی‌متر در طول فصل رشد ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷

عمق نمونه‌برداری (cm)	واکنش گل اشباع	هدایت الکتریکی خاک (dS.m <sup>-1</sup> )	کربن آلی (%)	فسفر قابل جذب (mg/kg)	پتاسیم قابل جذب (mg/kg)	آهن قابل جذب (mg/kg)	نیترژن کل (%)
۳۰-۰	۷/۲	۱/۹۱	۰/۴۵	۱۲/۴	۱۹۹	۳/۷۳	۰/۰۷
۶۰-۳۰	۷/۵	۲/۰۱	۰/۴۶	۱۳/۲	۱۶۴	۴/۹۰	۰/۰۵
عمق نمونه‌برداری (cm)	منگنز قابل جذب (mg/kg)	روی قابل جذب (mg/kg)	مس قابل جذب (mg/kg)	رس (%)	سیلت (%)	شن (%)	بافت خاک
۳۰-۰	۴/۷۵	۰/۶۵	۰/۶	۲۴	۳۶	۴۰	لومی
۶۰-۳۰	۳/۰۱	۰/۹۶	۰/۷	۲۷	۳۴	۳۹	لومی

مصرف علف‌کش تریفلورالین (ترفلان) به‌صورت پیش‌کاشتی به میزان ۲/۵ لیتر در هکتار به‌طور یکنواخت در سطح مزرعه انجام شد و به‌وسیله دیسک سبک، کود و علف‌کش با خاک مخلوط شد. پس از اجرای آزمایش مطابق نقشه کاشت، آبیاری به‌روش نشستی (جوی و پشته) صورت گرفت و زمان‌بندی آبیاری براساس تغییرات روزانه رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه با استفاده از دستگاه TDR (Germany, TRYME) (لوله‌های پروب دستگاه را در عمق ۱۰۰ سانتی‌متری خاک در قسمت بالای پشته و در قسمت‌های مختلف هر کرت آزمایشی قرار داده شد) انجام شد. بر این اساس، آبیاری در تیمار آبیاری کامل زمانی صورت گرفت که ۵۰ درصد رطوبت قابل‌استفاده (در این پژوهش با توجه به این‌که ظرفیت مزرعه‌ای خاک (FC) و نقطه پژمردگی دائم (PWP) به‌ترتیب ۲۴ و ۱۰ درصد بود، ۵۰ درصد رطوبت قابل‌استفاده زمانی بود که دستگاه TDR عدد ۱۷ درصد حجمی را نشان داد) از خاک تخلیه شد (Khodabin et al., 2022)، حجم آب مصرفی در هر آبیاری با استفاده از روابط (۱) و (۲) محاسبه شد.

$$\text{رابطه ۱)} \quad \text{MAD} = \text{FC} - \theta/\text{FC} - \text{PWP}$$

حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی خاک در سطح توسعه ریشه، FC و PWP به‌ترتیب رطوبت حجمی خاک در حد ظرفیت مزرعه و نقطه پژمردگی دائم و  $\theta$  محتوای رطوبت حجمی اندازه‌گیری‌شده توسط TDR می‌باشد.

$$\text{رابطه ۲)} \quad \text{ASW} = \text{FC} - \text{PWP} \quad \text{Vd} = \text{MAD} \times \text{ASW} \times \text{Rz} \times 10$$

در رابطه (۲)، ASW آب قابل‌دسترس (قابل‌استفاده)، Rz عمق توسعه ریشه (۱۰۰ سانتی‌متر) (Allen et al., 1998)) و عدد ثابت تبدیل (سانتی‌متر به میلی‌متر) است. جهت تعیین و کنترل مقدار آب از لوله‌های مجهز به کنتور استفاده شد. کل مقدار آب مصرفی در شرایط آبیاری کامل و قطع آبیاری به‌ترتیب ۵۳۰۰ و ۲۶۰۰ مترمکعب در هکتار در سال اول و ۴۲۰۰ و ۲۰۰۰ مترمکعب در هکتار در سال دوم بود.

کنترل آفات به‌ویژه شته مومی با استفاده از سموم کنفیدور (۲۵۰ میلی‌لیتر در هکتار) و دیمتوات (۱۵۰ میلی‌لیتر در هکتار) به‌صورت ترکیبی صورت گرفت. محلول براسینواستروئید با حل در اتانول و سپس رقیق‌شدن با آب MilliQ (اتانول: آب (V/V)=۱:۱۰۰۰۰) تهیه شد. محلول پاشی براسینواستروئید یک هفته قبل از قطع آبیاری از مرحله ۵۰ درصد گلدهی به بعد به‌وسیله سم‌پاش دستی (مدل GT-PS-12L مجهز به نازل اسپری مخروطی) یک مرتبه انجام شد. بوته‌های شاهد به‌طور هم‌زمان با آب MilliQ حاوی نسبت مشابه اتانول اسپری شدند (Ahammed et al., 2012). جهت اندازه‌گیری صفات فیزیولوژیک مانند کلروفیل، محتوای نسبی آب و پرولین در ساعت ۱۱ صبح، سه برگ جوان و توسعه‌یافته از بالای پوشش گیاهی سه ردیف میانی هر کرت برداشت شد. درصد محتوای نسبی آب برگ با رابطه زیر محاسبه شد (Rodriguez et al., 2002).

$$\text{رابطه ۳)} \quad \text{RWC} = (\text{FW} - \text{DW}) \div (\text{TW} - \text{DW}) \times 100$$

که در آن،  $RWC$  = محتوای نسبی آب برگ،  $FW$  = وزن تر برگ،  $TW$  = وزن برگ آماس شده،  $DW$  = وزن خشک برگ است. اندازه‌گیری غلظت کلروفیل با دستگاه اسپکتروفوتومتر (Australia, Varian Cary WinUV 6000i) انجام و جذب محلول در طول موج‌های ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر قرائت شد. نتایج برحسب میلی‌گرم بر گرم وزن تر محاسبه و ارائه شد (Arnon, 1949). مقدار پرولین برگ نیز در مرحله خورجین‌دهی و ۱۵ روز پس از اعمال قطع آبیاری، مقدار ۰/۱ گرم از ماده‌تر گیاهی (برگ) وزن شد و پس از انجام مراحل مختلف و عصاره‌گیری، مقدار پرولین در طول موج ۵۲۰ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر ذکر شده اندازه‌گیری (Bates *et al.*, 1973) و برحسب میکرومول بر گرم وزن تر بیان شد. همچنین از پرومتر (Cambridge, DELTA-T DEVICES)، جهت اندازه‌گیری مقاومت روزنه‌ای در مرحله خورجین‌دهی استفاده شد. جهت تعیین عملکرد دانه، در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک مساحتی به‌اندازه ۴/۸ مترمربع از هر کرت آزمایشی کف‌بر شد. سپس با استفاده از کمباین مخصوص، دانه‌ها از بوته جدا شد و در نهایت عملکرد بذر محاسبه شد. جهت تعیین درصد روغن دانه، از هر تیمار پنج گرم دانه توزین و پس از خشک کردن در ۷۲ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت، نمونه‌ها آسیاب شدند و سپس با استفاده از دستگاه (Germany, Bruker, mq20) NMR (۴۸ درصد روغن اندازه‌گیری شد).

در پایان پس از اطمینان از مفروضات آزمایشی، آزمون کلموگروف اسمیرنوف جهت نرمال بودن داده‌های هر سال آزمایش انجام شد و بعد از انجام آزمون بارتلت و اثبات همگن بودن واریانس‌ها، داده‌های آزمایش با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS (نسخه ۹/۴) تجزیه واریانس مرکب شدند. برای مقایسه میانگین در سطح پنج درصد اثرات متقابل از رویه برش‌دهی استفاده شد.

### ۳. نتایج و بحث

#### ۳.۱. مقاومت روزنه‌ای

نتایج تجزیه مرکب داده‌ها نشان داد اثر متقابل سال × آبیاری در سطح پنج درصد و اثرات متقابل آبیاری × براسینواستروئید و آبیاری × ژنوتیپ نیز در سطح یک درصد بر صفت مقاومت روزنه‌ای معنی‌دار بود (جدول ۴). کم‌ترین مقاومت روزنه‌ای در شرایط آبیاری کامل و محلول‌پاشی براسینواستروئید به ترتیب با میانگین ۱۹/۶ و ۲۵/۵ ثانیه بر سانتی‌متر حاصل شد که نسبت به شاهد در یک گروه آماری قرار داشتند (جدول ۵). قطع آبیاری در سال اول و دوم زراعی به ترتیب موجب افزایش ۳۰/۵ و ۲۵/۴ درصدی مقاومت روزنه‌ای برگ‌ها نسبت به شاهد گردید (جدول ۶). کاهش میزان مقاومت روزنه‌ای در سال دوم را می‌توان به افزایش بارندگی و رطوبت قابل دسترس نسبت داد که سبب کاهش شدت تنش وارده به گیاه شده است.

مقایسه میانگین برهم‌کنش آبیاری × ژنوتیپ نشان داد که در شرایط آبیاری کامل، ژنوتیپ احمدی بیش‌ترین مقاومت روزنه‌ای (۱۸/۴ ثانیه بر سانتی‌متر) را داشت که با دو ژنوتیپ نفیس و اکاپی در یک گروه آماری قرار داشتند و کم‌ترین مقاومت روزنه‌ای (۱۴/۸ ثانیه بر سانتی‌متر) به رقم نیلوفر تعلق داشت که با رقم نیما در یک گروه آماری قرار داشت، درحالی‌که در شرایط قطع آبیاری، بیش‌ترین و کم‌ترین مقاومت روزنه‌ای با ۲۴/۶ و ۱۹/۹ ثانیه بر سانتی‌متر به ترتیب در ژنوتیپ‌های اکاپی و نیلوفر مشاهده شد (جدول ۷).

مقاومت روزنه‌ای در شرایط قطع آبیاری در همه ژنوتیپ‌ها نسبت به شرایط آبیاری کامل افزایش یافت، این افزایش در شرایط تنش خشکی به علت بسته‌شدن روزنه‌ها می‌باشد. تنش خشکی در ارقام کلزا باعث افزایش مقاومت روزنه‌ای می‌شود (Khayat Moghadam *et al.*, 2021a) و با بسته‌شدن روزنه‌ها و در نتیجه کاهش دسترسی به  $CO_2$  در مزوفیل منجر به کاهش فتوسنتز گیاه می‌شود (Heidari, 2015). کاربرد براسینواستروئید در شرایط تنش باعث کاهش

مقاومت روزنه‌ای شد و توانست وضعیت آب را در گیاه کلزا در شرایط تنش بهبود ببخشد که با نتایج پژوهش‌های دیگر هم‌خوانی داشت (El-Khallal et al., 2009).

جدول ۴. نتایج تجزیه مرکب بررسی اثر براسینواستروئید بر عملکرد و صفات فیزیولوژیکی ژنوتیپ‌های کلزا تحت شرایط قطع آبیاری

میانگین مربعات								
منابع تغییرات	درجه آزادی	مقاومت روزنه‌ای	کربوهیدرات محلول برگ	پروتئین	کلروفیل کل	محتوای نسبی آب برگ	درصد روغن	عملکرد دانه
سال	۱	۱۰۷/۴۸**	۹۹۲/۱**	۱۷۱/۱۴**	۰/۶۹**	۲۲۱/۳**	۴/۲ ns	۲۳۹۳۷۳۰/۱**
سال (تکرار)	۴	۱/۰۱	۴/۲	۰/۹۴	۰/۰۲	۰/۴۱	۰/۷۲	۲۲۵۷۶۰/۷
آبیاری	۱	۸۹۱/۳۱**	۳۱۲۵/۳۱**	۶۱۲/۶**	۳/۳۳**	۱۲۶۱/۷**	۴۹/۵**	۳۶۷۲۶۰۰۹**
سال × آبیاری	۱	۱۱/۲۳*	۷۶/۵۶**	۱۰/۴۰**	۰/۱۱*	۳۶/۹۵**	۰/۸۱ ns	۶۶۵۸۱۰/۱**
براسینواستروئید	۳	۲۴۱۱/۷۳**	۷۰۴/۷۴**	۱۶۴/۹۵**	۰/۴۹**	۷۵۹/۸**	۱۱**	۱۱۸۱۲۹۶۳۶**
سال × براسینواستروئید	۳	۲/۲ ns	۱۳/۱۷ ns	۴/۰۱ ns	۰/۰۰۰۵ ns	۴/۶۴ ns	۱/۲ ns	۱۶۹۵۱۶/۵ ns
براسینواستروئید × آبیاری	۳	۶۰/۲۶**	۴۶/۲**	۳۷/۵۵**	۰/۱۳*	۳۹/۷۳**	۴/۱*	۱۷۰۸۱۳۷/۳**
سال × براسینواستروئید × آبیاری	۳	۱/۵۳۴ ns	۷/۲۱ ns	۲/۷۷ ns	۰/۰۳ ns	۶/۶۴ ns	۰/۳۶ ns	۳۰۵۹۶/۹ ns
سال × آبیاری × براسینواستروئید (تکرار)	۲۸	۱/۲۱	۳/۲۸	۱/۱۵	۰/۰۱	۱/۵	۰/۵۴	۴۰۳۱۹/۵۹
ژنوتیپ	۲	۷۳/۵**	۱۱۸/۸**	۳۱/۳۷**	۰/۱۲**	۶۴/۴۹**	۳/۶**	۲۴۲۲۹۱۳**
سال × ژنوتیپ	۲	۱/۹۸ ns	۴/۹۹ ns	۱/۳۴ ns	۰/۰۱۷ ns	۰/۵۱ ns	۰/۲۷ ns	۳۹۷۷۱/۰۹ ns
آبیاری × ژنوتیپ	۲	۴/۴۳**	۱۹/۲۷**	۰/۹۷ ns	۰/۰۴۴**	۶/۵**	۱/۱۱ ns	۶۱۸۳۹۰**
سال × آبیاری × ژنوتیپ	۲	۱/۴۱ ns	۲/۸۴ ns	۲/۴۳*	۰/۰۰۸ ns	۰/۳۶ ns	۰/۳۱ ns	۶۰۷۵۲/۴ ns
براسینواستروئید × ژنوتیپ	۶	۹۴/۰ ns	۵/۰۴ ns	۱/۶۴ ns	۰/۰۰۵ ns	۱/۹۴ ns	۰/۶ ns	۳۹۳۴۲۱ ns
سال × براسینواستروئید × ژنوتیپ	۶	۲/۳۶ ns	۴/۳ ns	۱/۵۲ ns	۰/۰۱۶ ns	۲/۱۱ ns	۰/۴۴ ns	۱۰۱۹۲۷/۴۱ ns
آبیاری × براسینواستروئید × ژنوتیپ	۶	۰/۷۱ ns	۱/۴۶ ns	۰/۷۵ ns	۰/۰۰۵ ns	۰/۸۳ ns	۰/۰۹ ns	۱۴۵۷۲۸/۶۸ ns
سال × آبیاری × براسینواستروئید × ژنوتیپ	۶	۱/۱۹ ns	۶/۷۳ ns	۱/۱۳ ns	۰/۰۰۹ ns	۲/۰۵ ns	۰/۱۹ ns	۷۵۴۹۷/۶ ns
خطا	۶۴	۰/۸۹	۱/۴۲	۱/۰۱	۰/۰۱۶	۱/۲۹	۰/۳۱	۱۹۳۶۲/۱۶
ضریب تغییرات (%)		۶/۷۷	۷/۱۴	۵/۲۶	۸/۶۹	۴/۲۹	۲/۲۷	۱۳/۷۱

ns, \* و \*\* به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و غیرمعنی‌داری.

جدول ۵. مقایسه میانگین برهم‌کنش دوگانه آبیاری × براسینواستروئید بر صفات مورد بررسی در ژنوتیپ‌های کلزا

آبیاری	براسینواستروئید (µmol)	پروتئین (µmol g <sup>-1</sup> FW)	مقاومت روزنه‌ای (S/cm)	کربوهیدرات محلول برگ (mg.g.FW)	کربوهیدرات کل (µmol g <sup>-1</sup> FW)	محتوای نسبی آب برگ (%)	محتوای روغن (%)	عملکرد دانه (kg/ha)
آبیاری کامل	۰	۱۳/۹۲±۰/۳۱b	۲۰/۲۹±۰/۸۹a	۳۶/۱۳±۰/۵۳ b	۱/۴۰±۰/۰۲ b	۸۳/۶±۰/۴۴ b	۴۴/۳±۰/۱۵a	۳۴۲۵±۸۳/۰۵b
	۰/۱	۱۵/۱۵±۰/۴ a	۱۹/۶۶±۰/۵۱ a	۳۹/۷۴±۰/۷۵ a	۱/۴۶±۰/۰۱ a	۸۹/۶±۰/۳۲ a	۴۴/۶±۰/۰۹a	۳۸۸۵/۴±۷۵/۲a
	LSD	۰/۹۲	۱/۰۱	۱/۶	۰/۰۵	۰/۹۶	۰/۳۴	۱۹۸/۲۶
قطع آبیاری از مرحله ۵۰ درصد گل‌دهی	۰	۱۷/۲±۰/۳۷b	۲۵/۷۲±۰/۶۶ a	۴۵/۳±۱/۰۷ a	۱±۰/۰۰۳۲ b	۷۷/۷±۰/۵۳ b	۴۲/۶۹±۰/۱۲ b	۲۱۳۴/۵±۱۳۲/۶ b
	۰/۱	۲۰/۷±۰/۳ a	۲۵/۵۲±۰/۵۸a	۳۴/۳۴±۰/۵۲ b	۱/۱۹±۰/۰۳۴ a	۸۲/۴±۰/۵۸a	۴۳/۷۴±۰/۱۴a	۳۰۰۱/۳±۹۲/۶a
	LSD	۰/۸۷	۰/۷۲	۱/۶۶	۰/۰۸	۱/۲۱	۰/۲۹	۲۶۲/۶

در هر ستون و برای هر عامل، میانگین‌هایی که دارای حروف مشابه هستند، براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

جدول ۶. مقایسه میانگین برهم‌کنش دوگانه سال × آبیاری بر صفات موردبررسی در ژنوتیپ‌های کلزا

سال	آبیاری	مقاومت روزنه‌ای (S/cm)	کربوهیدرات محلول برگ (mg.g.FW)	کلروفیل ( $\mu\text{molg}^{-1}$ FW)	محتوای نسبی آب برگ (%)	عملکرد دانه (kg/ha)
سال اول	آبیاری کامل	۱۶/۲±۰/۷۶ b	۴۰/۰۹±۰/۶۵b	۱/۳۹±۰/۰۲۱ a	۸۵/۵±۰/۵۹ a	۲۸۸۵/۴±۹۷/۸a
	قطع آبیاری از مرحله ۵۰ درصد گل‌دهی	۲۱/۱۴±۱/۱۳a	۵۱/۹۲±۱/۰۱ a	۰/۹۹±۰/۰۳۲ b	۷۷/۹۲±۰/۴۹ b	۲۳۵۲±۱۳۷/۵ b
	LSD	۰/۳۷	۱/۵۳	۰/۰۳۴	۰/۷۲	۱۶۹/۷۶
سال دوم	آبیاری کامل	۱۷/۵۶±۰/۸۲ b	۳۶/۱۶±۰/۶۱ b	۱/۴۸±۰/۰۱۶a	۸۷/۲±۰/۸a	۳۳۳۵±۷۰/۴ a
	قطع آبیاری از مرحله ۵۰ درصد گل‌دهی	۲۳/۶۶±۰/۹۵ a	۴۴/۸±۰/۰۶ a	۱/۲±۰/۰۳۱ b	۸۱/۸±۰/۵۳ b	۲۷۸۴/۷±۱۳۰/۳ b
	LSD	۰/۴۲	۲/۱۴	۰/۰۶۹	۱/۰۲	۱۲۷/۹

در هر ستون و برای هر عامل، میانگین‌هایی که دارای حروف مشابه هستند، براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

جدول ۷. مقایسه میانگین برهم‌کنش دوگانه آبیاری × ژنوتیپ بر صفات موردبررسی در ژنوتیپ‌های کلزا

آبیاری	ژنوتیپ	مقاومت روزنه‌ای (S/cm)	کربوهیدرات محلول برگ (mg.g.FW)	کلروفیل ( $\mu\text{molg}^{-1}$ FW)	محتوای نسبی آب برگ (%)	عملکرد دانه (kg/ha)
آبیاری کامل	نفیس	۱۷/۹±۱/۲۵ a	۳۹/۶±۰/۴۱ a	۱/۳۹±۰/۰۲۱ b	۸۵/۹۴±۱/۲۱ bc	۳۵۲۱±۱۴۳/۴ bc
	احمدی	۱۸/۴±۰/۹۴ a	۴۰/۳۶±۰/۹۷ a	۱/۳۹±۰/۰۲۲ b	۸۵/۲۱±۰/۸۳ c	۳۴۲۷/۸±۹۷/۱۲ c
	اکاپی	۱۸/۱±۰/۹۵ a	۳۸/۴۹±۱/۰۲ ab	۱/۴۱±۰/۰۱۹ ab	۸۵/۴±۰/۸۲ c	۳۶۵۲/۴±۱۰۴ bc
	نیما	۱۵/۳±۱/۳ b	۳۶/۵۵±۰/۸۲ bc	۱/۴۸±۰/۰۲۴ ab	۸۷/۱۲±۱/۰۶ ab	۳۸۰۹/۷±۱۱۵/۸ ab
	نیلوفر	۱۴/۸±۱/۴۹ b	۳۵/۶۶±۱/۵۵ c	۱/۴۹±۰/۰۵ a	۸۸/۲±۱/۵۲ a	۴۰۴۴/۷±۱۴۷/۲ a
LSD	۱/۳۱	۲/۵۳	۰/۰۸۷	۱/۵۲	۳۱۴/۵۸	
قطع آبیاری در مرحله ۵۰ درصد گل‌دهی	نفیس	۲۲/۱۸±۱/۷۸ bc	۴۸/۳±۱/۷ abc	۱/۱۳±۰/۰۶ ab	۸۰/۰۷±۱/۰۳ bc	۲۵۴۹/۷±۲۳۴ bc
	احمدی	۲۳/۷۷±۱/۳۷ ab	۵۰/۲۳±۱/۵۷ ab	۱/۰۱±۰/۰۴۷ bc	۸۷/۷±۰/۷۴ cd	۲۳۷۹/۲±۱۱۹ c
	اکاپی	۲۴/۵۹±۱/۳۳ a	۵۱/۷۴±۱/۵ a	۰/۹۶±۰/۰۴۲ c	۷۷/۰۶±۰/۸۴ d	۱۹۶۰/۵±۱۵۴/۲ d
	نیما	۲۱/۳۶±۱/۷ cd	۴۶/۸±۱/۵۶ bc	۱/۱۶±۰/۰۵۹ a	۸۱/۲±۰/۹۷ ab	۲۸۳۹±۱۸۹/۴ ab
	نیلوفر	۱۹/۹۲±۱/۹۲ d	۴۴/۷±۱/۴۱ c	۱/۲۳±۰/۰۵۳ a	۸۲/۳±۰/۹۳ a	۳۱۱۲/۳±۲۰۵/۶ a
LSD	۱/۶	۳/۶۴	۰/۱۳	۱/۹۱	۴۱۵/۷	

در هر ستون و برای هر عامل، میانگین‌هایی که دارای حروف مشابه هستند، براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

### ۳.۲. کربوهیدرات محلول برگ

جدول تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که برهم‌کنش سال × آبیاری، آبیاری × براسینواستروئید و آبیاری × ژنوتیپ در سطح یک درصد بر صفت کربوهیدرات محلول برگ معنی‌دار بود (جدول ۴). مقایسه میانگین آبیاری × براسینواستروئید نشان داد که بیش‌ترین میزان کربوهیدرات محلول برگ (۳۹/۷۴ میلی‌گرم در گرم وزن‌تر) در شرایط آبیاری کامل در تیمار براسینواستروئید ۰/۱ میکرومولار حاصل شد که نسبت به شاهد ۹ درصد افزایش داشت. در شرایط قطع آبیاری از مرحله ۵۰ درصد گل‌دهی، بالاترین میزان کربوهیدرات محلول با ۴۵/۳ میلی‌گرم در گرم وزن‌تر در براسینواستروئید ۰/۱ میکرومولار به‌دست آمد که نسبت به شاهد ۲۴/۲ درصد افزایش داشت (جدول ۵). بررسی برهم‌کنش سال × آبیاری نشان داد در سال اول و دوم آزمایش، بالاترین میزان کربوهیدرات محلول برگ به‌ترتیب با میانگین ۵۱/۹ و ۴۴/۸ میلی‌گرم در گرم وزن‌تر در شرایط قطع آبیاری از مرحله ۵۰ درصد گل‌دهی مشاهده شد (جدول ۶). کربوهیدرات محلول برگ در شرایط تنش خشکی در برگ‌ها افزایش می‌یابد، تنش خشکی در سال اول آزمایش موجب افزایش ۲۹/۵ درصدی کربوهیدرات محلول برگ شد، در سال دوم آزمایش نیز به‌دلیل شرایط محیطی مناسب‌تر ۲۳/۹ درصد افزایش یافت، که این افزایش نسبت به سال اول کم‌تر بود (جدول ۶). بررسی تأثیر سطوح آبیاری بر میزان کربوهیدرات محلول برگ ژنوتیپ‌های متفاوت کلزا نشان داد، در شرایط آبیاری کامل، ارقام نفیس و احمدی بیش‌ترین میزان کربوهیدرات محلول



برگ را دارا بودند که نسبت به شاهد (اکاپی) به ترتیب ۲/۸۰ و ۴/۹۳ درصد افزایش داشت، در حالی که در شرایط تنش خشکی بالاترین میزان کربوهیدرات محلول برگ با ۵۱/۷۴ میلی‌گرم در گرم وزن تر در ژنوتیپ اکاپی به دست آمد (جدول ۷). مصرف براسینواستروئیدها با افزایش قندهای محلول، اثرات تنش خشکی کلزا (*Brassica napus* L. cv. Fusia) را کاهش داده و باعث افزایش مقاومت به خشکی شود (Mousavi et al., 2009). اثر تنش خشکی روی کربوهیدرات‌ها به گونه و بافت گیاهی بستگی دارد (Boroujerdnia et al., 2016). تنش خشکی توانست میزان قندهای محلول گلوکز، مانوز و رامنوز در بافت‌های ارقام کلزا افزایش و در رقم‌های مختلف، میزان متفاوتی را نشان دهد (Mirzaee et al., 2013). کربوهیدرات محلول برگ به واسطه حفظ آماس در برگ‌های تحت تنش، از دهیدراسیون پروتئین‌ها و غشاهای سلولی جلوگیری می‌کند (Sevanto, 2018).

### ۳.۳. کلروفیل کل

میزان کلروفیل کل برگ در اثرات متقابل آبیاری × براسینواستروئید و سال × آبیاری در سطح پنج درصد و هم‌چنین آبیاری × ژنوتیپ در سطح یک درصد بر صفت کلروفیل کل برگ معنی‌دار بود (جدول ۴). مقایسه میانگین آبیاری × براسینواستروئید نشان داد که بیش‌ترین میزان کلروفیل کل (۱/۴ میکرومول در گرم وزن تر) در شرایط آبیاری کامل در تیمار براسینواستروئید ۰/۱ میکرومولار حاصل شد که نسبت به شاهد ۴/۳ درصد افزایش را نشان داد. در شرایط قطع آبیاری از مرحله ۵۰ درصد گل‌دهی، بالاترین میزان کلروفیل کل با ۱/۲ میکرومول در گرم وزن تر در براسینواستروئید ۰/۱ میکرومولار به دست آمد که نسبت به شاهد ۱۹ درصد افزایش را نشان داد (جدول ۵). کلروفیل کل در شرایط تنش خشکی در برگ‌ها کاهش می‌یابد، تنش خشکی در سال اول آزمایش موجب کاهش ۲۸/۷ درصدی کلروفیل کل شد، در سال دوم آزمایش نیز به دلیل شرایط محیطی مناسب‌تر ۱۸/۹ درصد کاهش یافت، که این کاهش نسبت به سال اول کم‌تر بود (جدول ۶). بررسی تأثیر سطوح آبیاری بر میزان کلروفیل کل ژنوتیپ‌های کلزا نشان داد، در شرایط آبیاری کامل، ژنوتیپ نیلوفر بیش‌ترین میزان کلروفیل کل را دارا بود که نسبت به اکاپی (شاهد) ۵/۷ درصد افزایش داشت و کم‌ترین میزان کلروفیل کل در ژنوتیپ‌های نفیس و احمدی با میانگین ۱/۴ میکرومول در گرم وزن تر مشاهده شد. در شرایط تنش خشکی بالاترین میزان کلروفیل کل با میانگین ۱/۲ میکرومول در گرم وزن تر در ژنوتیپ نیلوفر مشاهده شد که با ژنوتیپ نیما در یک گروه آماری قرار داشت و ژنوتیپ اکاپی نیز با میانگین ۰/۹۶ میکرومول در گرم وزن تر کم‌ترین میزان کلروفیل کل را داشت (جدول ۷).

کاربرد براسینواستروئید میزان کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل را به میزان ۲۶، ۵۸ و ۳۳ درصد تحت تنش خشکی در گیاه لوبیاجیتی افزایش داد (Lima & Lobato, 2017)، که با نتایج این پژوهش مطابقت داشت. علاوه بر این، براسینواستروئید تبادل گازی را در برگ بهبود می‌بخشد و فرایند تثبیت CO<sub>2</sub> را تحت تنش خشکی بهبود می‌بخشد. در شرایط تنش خشکی، با تولید اکسیژن‌های فعال، کلروپلاست تخریب‌شده و در اثر آن میزان کلروفیل و فتوسنتز برگ به دلیل تجزیه پروتئین‌ها کاهش می‌یابد (Hasan et al., 2018).

### ۴.۳. پرولین

نتایج تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که اثر متقابل سال × آبیاری و آبیاری × براسینواستروئید در سطح یک درصد و هم‌چنین اثر متقابل سه‌گانه سال × آبیاری × ژنوتیپ بر صفت پرولین برگ نیز در سطح پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۴). در شرایط آبیاری کامل، بیش‌ترین میزان پرولین برگ (۱۵/۱ میکرومول در گرم وزن تر) در براسینواستروئید ۰/۱

میکرومولار به‌دست آمد، به‌طوری‌که براسینواستروئید موجب افزایش ۸/۸ درصدی پرولین نسبت به تیمار شاهد (۱۳/۹ میکرومول در گرم وزن‌تر) شد (جدول ۵). در شرایط قطع آبیاری از مرحله ۵۰ درصد گلدهی بیش‌ترین میزان این صفت نیز در براسینواستروئید ۰/۱ میکرومولار (۲۰/۷ میکرومول در گرم وزن‌تر) حاصل شد که نسبت به شاهد (۱۷/۳ میکرومول در گرم وزن‌تر) افزایش ۱۹/۶ درصدی داشت (جدول ۵). اعمال تنش منجر به افزایش پرولین در تمامی ژنوتیپ‌ها در دو سال زراعی شد. به‌طوری‌که در سال اول زراعی در شرایط آبیاری کامل، بیش‌ترین میزان پرولین در ژنوتیپ نفیس (۱۷/۱ میکرومول در گرم وزن‌تر) به‌دست آمد، درحالی‌که کم‌ترین میزان پرولین با ۱۴/۶ میکرومول در گرم وزن‌تر در رقم نیلوفر حاصل شد که نسبت به شاهد ۱۳ درصد کاهش داشت (جدول ۸). در سال اول زراعی و در شرایط قطع آبیاری نیز بیش‌ترین مقدار پرولین (۲۲/۳ میکرومول در گرم وزن‌تر) در ژنوتیپ نیلوفر به‌دست آمد که نسبت به شاهد ۱۸/۲ درصد افزایش داشت و ژنوتیپ نیما در یک گروه آماری قرار داشت. در سال دوم آزمایش در آبیاری کامل، بیش‌ترین میزان پرولین (۱۴/۹ میکرومول در گرم وزن‌تر) در ژنوتیپ نفیس به‌دست آمد که نسبت به شاهد ۱۳ درصد افزایش داشت. هم‌چنین در سال دوم آزمایش به همراه قطع آبیاری، ژنوتیپ اکاپی (۱۸/۷ میکرومول در گرم وزن‌تر) بیش‌ترین و ژنوتیپ نیلوفر (۱۶/۷ میکرومول در گرم وزن‌تر) کم‌ترین میزان پرولین را داشتند (جدول ۸).

جدول ۸. مقایسه میانگین برهم‌کنش سه‌گانه سال × آبیاری × ژنوتیپ بر صفات موردبررسی در ژنوتیپ‌های کلزا

سال	آبیاری	ژنوتیپ	پرولین ( $\mu\text{molg}^{-1}$ FW)
سال اول	آبیاری کامل	نفیس	۱۷/۱۶±۱/۰۴ a
		احمدی	۱۵/۳±۰/۱۶ bc
		اکاپی	۱۶/۵±۰/۹۹ ab
		نیما	۱۵/۲±۰/۳۱ bc
		نیلوفر	۱۴/۶±۰/۱۹ c
	LSD		۱/۵۱
سال اول	قطع آبیاری از مرحله ۵۰ درصد گل‌دهی	نفیس	۲۰/۰۶±۱/۲۳ b
		احمدی	۱۹/۱۸±۰/۸۶ bc
		اکاپی	۱۸/۲۱±۰/۹۹ c
		نیما	۲۱/۵±۰/۸۷ a
		نیلوفر	۲۲/۲۷±۰/۸۴ a
	LSD		۱/۳۲
سال دوم	آبیاری کامل	نفیس	۱۴/۹±۰/۷۳ a
		احمدی	۱۴/۰۶±۰/۷۲ ab
		اکاپی	۱۳/۱۷±۰/۷۶ bc
		نیما	۱۲/۴۲±۰/۴۰ cd
		نیلوفر	۱۱/۸۸±۰/۳۲ d
	LSD		۰/۹۱
سال دوم	قطع آبیاری از مرحله ۵۰ درصد گل‌دهی	نفیس	۱۷/۹۷±۰/۷۸ ab
		احمدی	۱۸/۳±۰/۹۰ ab
		اکاپی	۱۸/۷۲±۱/۰۶ a
		نیما	۱۷/۵۰±۰/۵۴ bc
		نیلوفر	۱۶/۶۳±۰/۲۴ c
	LSD		۱/۰۹

در هر ستون و برای هر عامل، میانگین‌هایی که دارای حروف مشابه هستند، براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

کاربرد براسینواستروئید باعث سنتز پرولین در سلول‌های گیاهی در شرایط تنش خشکی می‌شود (Chen *et al.*, 2018; Saffari *et al.*, 2014). اعتقاد بر این است براسینواستروئید با تحریک  $\Delta 1$ -پیرولین-S-کربوکسیلات سنتاز که آنزیم کلیدی مسیر بیوسنتزی پرولین است، تجمع پرولین را افزایش می‌دهد (Sharma *et al.*, 2011). علاوه بر این، تجمع پرولین تنظیم‌شده با براسینواستروئید نیز نقش مهمی در حفظ محتوای آب بافت‌های گیاهی ایفا می‌کند (Anjum *et al.*, 2011). به دلیل نقش پرولین در تنظیم اسمزی میزان آن در شرایط قطع آبیاری افزایش می‌یابد، این امر موجب حفظ تورژسانس سلول که نقش حفاظت گیاه در شرایط تنش خشکی را بر عهده دارد می‌شود (Khayat Moghadam *et al.*, 2021b). نتایج حاصل از پژوهش‌های انجام‌شده در گیاه ذرت (Nasrollahzade *et al.*, 2017) و آفتابگردان (Sadat Asilan, 2016) تحت شرایط تنش خشکی با نتایج این آزمایش مشابه می‌باشد.

### ۵.۳. محتوای نسبی آب برگ

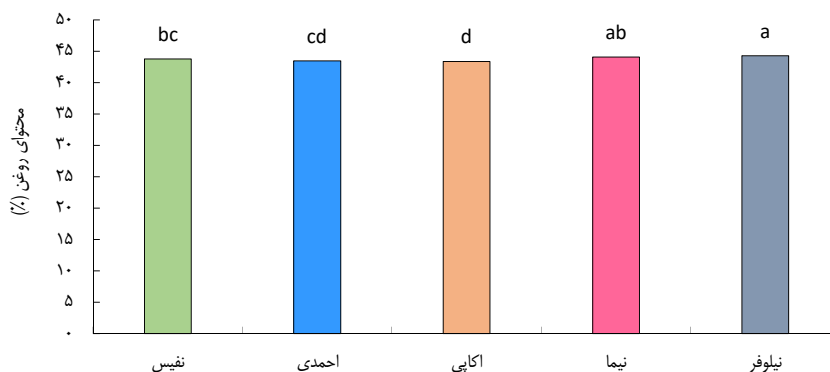
تجزیه واریانس آزمایش نشان داد که اثرات متقابل سال  $\times$  آبیاری، براسینواستروئید  $\times$  آبیاری و آبیاری  $\times$  ژنوتیپ در سطح یک درصد بر صفت محتوای نسبی آب برگ معنی‌دار بود (جدول ۴). مقایسه میانگین آبیاری  $\times$  براسینواستروئید نشان داد که بیش‌ترین محتوای نسبی آب برگ در شرایط آبیاری کامل در تیمار براسینواستروئید  $0/1$  میکرومولار با میانگین  $89/6$  درصد مشاهده شد که نسبت به شاهد  $6/7$  درصد افزایش داشت. در شرایط قطع آبیاری بعد از  $50$  درصد گل‌دهی، بیش‌ترین محتوای نسبی آب با  $82/4$  درصد در براسینواستروئید  $0/1$  میکرومولار به دست آمد که نسبت به شاهد  $5/7$  درصد افزایش داشت (جدول ۵). تنش خشکی در سال اول آزمایش موجب کاهش  $8/8$  درصدی محتوای نسبی آب شد و در سال دوم آزمایش نیز به دلیل شرایط محیطی مناسب‌تر  $6/2$  درصد کاهش یافت (جدول ۶). مقایسه میانگین آبیاری  $\times$  ژنوتیپ نشان داد، در شرایط آبیاری کامل، ژنوتیپ نیلوفر بیش‌ترین محتوای نسبی آب را داشت که نسبت به شاهد (اکاپی)  $0/6$  درصد افزایش داشت و کم‌ترین محتوای نسبی آب در ژنوتیپ‌های اکاپی و احمدی به ترتیب با میانگین  $85/4$  و  $85/2$  درصد مشاهده شد. در شرایط تنش خشکی، در ژنوتیپ نیلوفر با میانگین  $82/3$  درصد بیش‌ترین و ژنوتیپ اکاپی نیز با میانگین  $77/06$  درصد کم‌ترین محتوای نسبی آب را داشتند (جدول ۷).

براسینواستروئید محتوای نسبی آب را با بهبود پتانسیل آب، پتانسیل اسمزی و پتانسیل فشار حفظ می‌کند (Farooq *et al.*, 2009)، که به دلیل دخالت آن در حفظ نفوذپذیری غشای پلاسمایی است (Hamada, 1986). کاهش مقدار آب قابل‌دسترس و جذب‌شده در شرایط تنش خشکی قادر است محتوای نسبی آب برگ ارقام کلزا را کاهش دهد و این کاهش در ارقام مختلف، متفاوت است (Khayat Moghadam *et al.*, 2021a). به نظر می‌رسد این بهبود ممکن است به دلیل کاهش تعرق برگ‌ها باشد (Li & Feng, 2011). براسینواستروئید توانست محتوای نسبی آب برگ را در شرایط تنش خشکی افزایش دهد که با نتایج پژوهش‌های دیگر مطابقت داشت (Li *et al.*, 2012).

### ۶.۳. درصد روغن

جدول تجزیه واریانس آزمایش نشان داد که اثر ساده ژنوتیپ در سطح یک درصد و همچنین اثر متقابل براسینواستروئید  $\times$  آبیاری بر صفت محتوای روغن در سطح پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۴). بررسی‌ها نشان داد تنش خشکی در شرایط  $50$  درصد گل‌دهی کلزا، نسبت به شرایط آبیاری کامل محتوای روغن دانه را کاهش داد. با این حال، براسینواستروئید شرایط را نسبت به شاهد بهبود داد. در شرایط آبیاری کامل بیش‌ترین محتوای روغن در تیمار براسینواستروئید  $0/1$  میکرومولار ( $44/6$  درصد) مشاهده شد که البته با شاهد از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۵). در شرایط

قطع آبیاری، بیش‌ترین محتوای روغن دانه در تیمار براسینواستروئید  $0/1$  میکرومولار با میانگین  $43/7$  درصد به‌دست آمد که نسبت به شاهد  $2/4$  درصد افزایش داشت. بالاترین محتوای روغن ( $44/3$  درصد) در ژنوتیپ نیلوفر و کم‌ترین آن با  $43/4$  درصد در ژنوتیپ اکاپی مشاهده شد (شکل ۱).



شکل ۱. مقایسه میانگین اثر ساده ژنوتیپ بر محتوای روغن. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون براساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

پژوهش‌ها نشان داده است که محتوای روغن کلزا تحت تأثیر عوامل ژنتیکی، محیطی و شرایط مدیریتی است (Assefa *et al.*, 2014). براسینواستروئید به‌طور قابل‌توجهی درصد روغن گیاه گل‌رنگ را افزایش داد و توانست عملکرد روغن را در شرایط تنش خشکی افزایش دهد (Zafari *et al.*, 2020). در مطالعه حاضر، تیمار براسینواستروئید تنش خشکی را تعدیل کرد و با سایر مطالعات هم‌خوانی داشت (Tanveer *et al.*, 2019). این مطالعات تأکید می‌کنند که براسینواستروئید باعث افزایش سطح ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و همچنین محتوای روغن شده و منجر به افزایش مقاومت گیاهان در برابر کمبود آب می‌شود.

### ۷.۳. عملکرد دانه

بررسی برهم‌کنش سال  $\times$  آبیاری، براسینواستروئید  $\times$  آبیاری و آبیاری  $\times$  ژنوتیپ نیز در سطح یک درصد بر این صفت معنی‌دار بود (جدول ۴). مقایسه میانگین آبیاری  $\times$  براسینواستروئید نشان داد که بیش‌ترین عملکرد دانه در شرایط آبیاری کامل در تیمار براسینواستروئید  $0/1$  میکرومولار با میانگین  $3885/4$  کیلوگرم در هکتار حاصل شد که نسبت به شاهد  $11/6$  درصد افزایش را نشان داد. در شرایط قطع آبیاری از مرحله ۵۰ درصد گل‌دهی، بیش‌ترین عملکرد دانه با میانگین  $3001/4$  کیلوگرم در هکتار در براسینواستروئید  $0/1$  میکرومولار به‌دست آمد که نسبت به شاهد  $28/8$  درصد افزایش را نشان داد (جدول ۵). مقایسه میانگین برهم‌کنش دوگانه سال  $\times$  آبیاری بر این صفت نشان داد قطع آبیاری در سال اول و دوم زراعی به‌ترتیب منجر به کاهش  $39/4$  و  $18/9$  درصدی نسبت به تیمار شاهد شد (جدول ۶). افزایش بارندگی در سال دوم نسبت به سال اول (جدول ۱)، باعث این اختلاف درصد کاهش در سال اول و دوم نسبت به شرایط تنش خشکی شد که نشان از محدودیت افزایش عملکرد دانه کلزا با توجه به مقدار رطوبت قابل‌دسترس دارد، چراکه افزایش بارندگی بیش‌تر موجب بهبود شرایط تنش خشکی می‌شود. در شرایط آبیاری کامل، رقم نیلوفر با میانگین  $4044/7$  کیلوگرم در هکتار بیش‌ترین عملکرد دانه را داشت که نسبت به ژنوتیپ اکاپی (شاهد)  $10/7$  درصد عملکرد بیش‌تری داشت. در شرایط قطع آبیاری نیز ژنوتیپ نیلوفر در شرایط تنش خشکی با میانگین

۳۱۱۲/۳ کیلوگرم در هکتار بیش‌ترین و ژنوتیپ اکاپی با ۱۹۶۰/۵ کیلوگرم در هکتار کم‌ترین عملکرد دانه را داشتند. بیش‌ترین (۴۰۴۴/۷ کیلوگرم در هکتار) و کم‌ترین (۳۴۲۷/۸ کیلوگرم در هکتار) میزان عملکرد در شرایط آبیاری کامل به‌ترتیب در ژنوتیپ‌های نیلوفر و احمدی حاصل شد و تنش خشکی در مرحله گل‌دهی منجر به کاهش عملکرد دانه شد (جدول ۷).  
براسینواستروئید ممکن است با تغییر فعالیت‌های آنزیمی و افزایش پایداری غشاهای کلروپلاست و سایر رنگ‌دانه‌ها، عملکرد دانه را افزایش دهند، که در نهایت منجر به عرضه قوی فوتوسیمپلات‌ها (مواد فتوسنتزی ساخته‌شده) می‌شود (Yue et al., 2019). پژوهش‌گران بهبود قابل‌توجهی در عملکرد گیاهان ذرت پس از کاربرد خارجی براسینواستروئید تحت تنش خشکی گزارش کردند (Talaat et al., 2015; Anjum et al., 2011). اعمال تنش خشکی بر روی عملکرد و اجزای عملکرد در ارقام کلزا تأثیرگذار بود (Khayat Moghadam et al., 2021c). در پژوهشی دیگر اعمال تنش خشکی به‌دلیل کاهش فعالیت فتوسنتزی و همچنین کاهش کربوهیدرات و سایر قندها منجر به کاهش عملکرد در گیاه ذرت شد (Anjum et al., 2017).

#### ۴. نتیجه‌گیری

به‌طور کلی می‌توان چنین نتیجه گرفت که براسینواستروئید با بهبود صفات فیزیولوژیک و صفات مؤثر بر عملکرد چه در شرایط آبیاری نرمال و تنش آبی آخر فصل منجر به افزایش عملکرد دانه کلزا گردید، اما میزان اثرگذاری این هورمون در شرایط تنش بسیار بیش‌تر از شرایط آبیاری نرمال بود. همچنین نتایج نشان دادند که رقم نیلوفر در هر دو شرایط آبیاری مناسب نیمه‌خشک است. اما در زمانی که پیش‌بینی‌های آب‌وهوایی در منطقه کرج و اقلیم‌های مشابه نشان از کم‌آبی در بهار را دارد، با توجه به غالب بودن رقم اکاپی در کشت پاییزه منطقه نسبت به سایر ارقام باید از انتخاب این رقم جهت کشت به‌دلیل دیررس بودن و برخورد مرحله پرشدن دانه با شرایط گرم و کم‌آبی، خودداری نمود.

#### ۵. تشکر و قدردانی

از زحمات استادان و کارکنان محترم مزرعه پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج (ماهدشت) که در انجام این مهم یاری کردند، تشکر و قدردانی می‌گردد.

#### ۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

#### ۷. منابع

- Ahamed, G. J., Gao, C. J., Ogweno, J. O., Zhou, Y. H., Xia, X. J., Mao, W. H., & Yu, J. Q. (2012). Brassinosteroids induce plant tolerance against phenanthrene by enhancing degradation and detoxification in *Solanum lycopersicum* L. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 80, 28-36.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO *Irrigation and Drainage*. Fao, Rome, 300(9), D05109.
- Anjum, S. A., Ashraf, U., Zohaib, A., Tanveer, M., Naeem, M., Ali, I., & Nazir, U. (2017). Growth and development responses of crop plants under drought stress: A review. *Zemdirbyste*, 104(3), 267-276.

- Anjum, S. A., Tanveer, M., Hussain, S., Tung, S. A., Samad, R. A., Wang, L., & Shahzad, B. (2016). Exogenously applied methyl jasmonate improves the drought tolerance in wheat imposed at early and late developmental stages. *Acta Physiologiae Plantarum*, 38(1), 25.
- Anjum, S. A., Wang, L. C., Farooq, M., Hussain, M., Xue, L. L., & Zou, C. M. (2011). Brassinolide application improves the drought tolerance in maize through modulation of enzymatic antioxidants and leaf gas exchange. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 197(3), 177-185.
- Arnon, D. I. (1949). Copper enzymes in isolated chloroplasts, polyphenoxidase in *beta vulgaris*. *Plant Hysiology*, 24, 1-15.
- Assefa, Y., Roozeboom, K., & Stamm, M. (2014). Winter canola yield and survival as a function of environment, genetics, and management. *Crop Science*, 54(5), 2303-2313.
- Bates, L. S., Waldren, R. P., & Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 39(1), 205-207.
- Boroujerdnia, M., Bihamta, M., Alami Said, K., & Abdossi, V. (2016). Effect of drought tension on proline content, soluble carbohydrates, electrolytes leakage and relative water content of bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Scientific Journal of Crop Physiology*. I.A.U. Ahvaz. 8(29), 23-41. (In Persian).
- Chen, Z., Wang, Z., Yang, Y., Li, M., & Xu, B. (2018). Abscisic acid and brassinolide combined application synergistically enhances drought tolerance and photosynthesis of tall fescue under water stress. *Scientia Horticulturae*, 228, 1-9.
- El-Khallal, S. M., Hathout, T. A., Ashour, A. A., & Kerrit, A. A. (2009). Brassinolide and salicylic acid induced growth, biochemical activities and productivity of maize plants grown under salt stress. *Research Journal of Agriculture and Biological Sciences*, 5(4), 380-390.
- FAO, (2015). Statistics Division. Accessed March 2015. <http://faostat3.fao.org/download/T/TP/E>.
- Farooq, M., Wahid, A., & Basra, S. M. A. (2009). Improving water relations and gas exchange with brassinosteroids in rice under drought stress. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 195(4), 262-269.
- Gruszka, D. (2020). Exploring the brassinosteroid signaling in monocots reveals novel components of the pathway and implications for plant breeding. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(1), 354.
- Hamada, K. (1986). Brassinolide: some effects for crop cultivations. In *Conference Proceedings of International Seminar Plant Growth Regul*. Tokyo, Japan, 188-196.
- Hamzei, J., & 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 & Environment*, 155, 153-160.
- Hasan, M. M. U., Ma, F., Prodhan, Z. H., Li, F., Shen, H., Chen, Y., & Wang, X. (2018). Molecular and physio-biochemical characterization of cotton species for assessing drought stress tolerance. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(9), 2636.
- Heidari, N. (2015). Effects of drought stress on photosynthesis, its parameters and relative water content of anise (*Pimpinella anisum* L.) *Journal of Plant Research*, 27(5), 829-839. (In Persian).
- Khayat Moghadam, M. S., Gholami, A., Shirani Rad, A. H., BaradaranFiroozabadi, M., & Abbasdokht, H. (2021a). The effect of Potassium silicate and late-season drought stress on the physiological characters of Canola. *Journal of Crops Improvement*. (In Persian).
- Khayat Moghadam, M. S., Shirani Rad, A. H., Baradaran Firoozabadi, M., & Abbasdokht, H. (2021b). The impact of potassium silicate foliar application on some morphological, physiological and biochemical properties of rape genotypes under late seasonal drought stress. *Journal of Plant Research*. (In Persian).

- Khayat Moghadam, M. S., Gholami, A., Shirani Rad, A. H., Baradaran Firoozabadi, M., & Abbasdokht, H. (2021c). Evaluation crop indices of canola spring genotypes in terminal drought stress conditions and foliar application of potassium silicate. *Journal of Environmental Stresses in Crop Sciences*. (In Persian).
- Khodabin, G., Lightburn, K., Hashemi, S. M., Moghadam, M. S. K., & Jalilian, A. (2022). Evaluation of nitrate leaching, fatty acids, physiological traits and yield of rapeseed (*Brassica napus*) in response to tillage, irrigation and fertilizer management. *Plant and Soil*, 1-18.
- Khodabin, G., Tahmasebi-Sarvestani, Z., Rad, A. H. S., Modarres-Sanavy, S. A. M., Hashemi, S. M., & Bakhshandeh, E. (2021). Effect of late-season drought stress and foliar application of ZnSO<sub>4</sub> and MnSO<sub>4</sub> on the yield and some oil characteristics of rapeseed cultivars. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21(3), 1904-1916.
- Li, B., Zhang, C., Cao, B., Qin, G., Wang, W., & Tian, S. (2012). Brassinolide enhances cold stress tolerance of fruit by regulating plasma membrane proteins and lipids. *Amino Acids*, 43(6), 2469-2480.
- Li, K. R., & Feng, C. H. (2011). Effects of brassinolide on drought resistance of *Xanthoceras sorbifolia* seedlings under water stress. *Acta Physiologiae Plantarum*, 33(4), 1293-1300.
- Lima, J. V., & Lobato, A. K. S. (2017). Brassinosteroids improve photosystem II efficiency, gas exchange, antioxidant enzymes and growth of cowpea plants exposed to water deficit. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 23(1), 59-72.
- Liu, J., Gao, H., Wang, X., Zheng, Q., Wang, C., Wang, X., & Wang, Q. (2014). Effects of 24-epibrassinolide on plant growth, osmotic regulation and ion homeostasis of salt-stressed canola. *Plant Biology*, 16(2), 440-450.
- Mirzaee, M., Moieni, A., & Ghanati, F. (2013). Effect of drought stress on proline and soluble sugar content in canola (*Brassica napus* L.) seedlings. *Iranian Journal of Biology*. (In Persian).
- Mousavi, E.A., Kalantari, K.M., & Jafari, S.R. (2009). Change of some osmolytes accumulation in water-stressed colza (*Brassica napus* L.) as affected by 24-epibrassinolide. *Iranian Journal of Science Technology*, 33, 1-11. (In Persian).
- Nasrollahzade Asl, V., Shiri, M.R., Moharramnejad, S., Yusefi, M., & Baghbani Mehmandar, F. (2017). Effect of drought tension on agronomy and biochemical traits of three maize hybrids (*Zea mays* L.). *Crop Physiology Journal*, 8(32), 45-60. (In Persian).
- Qian, B., Jing, Q., Belanger, G., Shang, J., Huffman, T., Liu, J., & Hoogenboom, G. (2018). Simulated canola yield responses to climate change and adaptation in Canada. *Journal of Agronomy*, 110, 133-146.
- Rashidi, F., Majidi, M.M., & Pirboveiry, M. (2017). Response of different species of Brassica to water deficit. *International Journal of Plant Production*, 11(1), 1-16.
- Rashtbari, M., Hossein Ali, A., & Ghorchiani, M. (2020). Effect of vermicompost and municipal solid waste compost on growth and yield of canola under drought stress conditions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 51(17), 2215-2222.
- Rathnakumar, A.L., & Sujatha, M. (2022). Breeding Major Oilseed Crops: Prospects and Future Research Needs. *In Accelerated Plant Breeding*, 4, 1-40. Springer, Cham.
- Rodriguez, D. D., Philips, D. B. S., Rodriguez-García, R., & Angulo-Sánchez, J. L. (2002). Grain yield and fatty acid composition of sunflower seed for cultivars developed under dryland conditions. *Trends in new crops and new uses. American Society for Horticultural Science Press, Alexandria*, 139-142.
- Sadat Asilan, K. (2016). Effect of water deficit stress on soluble sugars, proline, protein and chlorophyll content in Sunflower (*Helianthus annuus* L.) hybrids. *Iran Journal Filed Crop Science*, 47, 184-175. (In Persian).
- Saffari, M., Ahmadi, J., Khosh, K. S. N., & Shobbar, Z. (2014). Influence of brassinosteroid and cytokinin hormones spray on activity and gene expression of catalase and proline in two cultivars of canola under drought stress. *Modern Genetics Journal*, 9(3), 329-349.

- Salehi-Lisar, S. Y., & Bakhshayeshan-Agdam, H. (2016). Drought stress in plants: causes, consequences, and tolerance. *In Drought Stress Tolerance in Plants, 1*, 1-16. Springer, Cham.
- Sevanto, S. (2018). Drought impacts on phloem transport. *Current Opinion in Plant Biology, 43*, 76-81.
- Sharghi, Y., Rad, A.H.S., Band, A.A., Noormohammadi, G., & 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.
- Sharma, I., Pati, P. K., & Bhardwaj, R. (2011). Effect of 24-epibrassinolide on oxidative stress markers induced by nickel-ion in *Raphanus sativus* L. *Acta Physiologiae Plantarum, 33*(5), 1723-1735.
- Shu, S., Tang, Y., Yuan, Y., Sun, J., Zhong, M., & Guo, S. (2016). The role of 24-epibrassinolide in the regulation of photosynthetic characteristics and nitrogen metabolism of tomato seedlings under a combined low temperature and weak light stress. *Plant Physiology and Biochemistry, 107*, 344-353.
- Sidhu, G.P.S., & Bali, A.S. (2022). Plant responses to drought stress: role of brassinosteroids. In *Brassinosteroids in Plant Developmental Biology and Stress Tolerance*, 201-216. Academic Press.
- Talaat, N. B., Shawky, B. T., & Ibrahim, A. S. (2015). Alleviation of drought-induced oxidative stress in maize (*Zea mays* L.) plants by dual application of 24-epibrassinolide and spermine. *Environmental and Experimental Botany, 113*, 47-58.
- Tanveer, M., Shahzad, B., Sharma, A., & Khan, E. A. (2019). 24-Epibrassinolide application in plants: An implication for improving drought stress tolerance in plants. *Plant Physiology and Biochemistry, 135*, 295-303.
- Tanveer, M., Shahzad, B., Sharma, A., Biju, S., & Bhardwaj, R. (2018). 24-Epibrassinolide; an active brassinolide and its role in salt stress tolerance in plants: a review. *Plant Physiology and Biochemistry, 130*, 69-79.
- Vardhini, B. V., Sujatha, E., & Rao, S. S. R. (2011). Studies on the effect of brassinosteroids on the qualitative changes in the storage roots of radish. *Asian and Australasian Journal of Plant Science and Biotechnology, 5*(1), 27-30.
- Xia, X. J., Wang, Y. J., Zhou, Y. H., Tao, Y., Mao, W. H., Shi, K., ..., & Yu, J. Q. (2009). Reactive oxygen species are involved in brassinosteroid-induced stress tolerance in cucumber. *Plant Physiology, 150*(2), 801-814.
- Yazdandoost Hamedani, M. (2021). Introducing domestic rapeseed cultivars suitable for planting in cold and temperate cold climates of the country, *Agricultural Research Education And Extension Organization*, ISBN: 978-964-520-842-2
- Yue, J., You, Y., Zhang, L., Fu, Z., Wang, J., Zhang, J., & Guy, R. D. (2019). Exogenous 24-epibrassinolide alleviates effects of salt stress on chloroplasts and photosynthesis in *Robinia pseudoacacia* L. seedlings. *Journal of Plant Growth Regulation, 38*(2), 669-682.
- Zafari, M., Ebadi, A., Jahanbakhsh, S., & Sedghi, M. (2020). Safflower (*Carthamus tinctorius*) biochemical properties, yield, and oil content affected by 24-epibrassinosteroid and genotype under drought stress. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 68*(22), 6040-6047.