



Evaluation the Effect of Brassinosteroid on The Improvement of Oil Quality and Yield of Rapeseed Genotypes under Late-Season Drought Stress

Mahsa Rafati Alashti¹ | Shahryar Kazemi² | Mojdeh Sadat Khayat Moghadam³

1. Department of Agricultural Sciences, Payame Noor University, Tehran, Iran. E-mail: m.alashti@pnu.ac.ir
2. Department of Agricultural Sciences, Payame Noor University, Tehran, Iran. E-mail: Sh.kazemi@pnu.ac.ir
3. Corresponding Author, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Shahrood University of Technology, Semnan, Iran. E-mail: Moghadam.mojde@shahroodut.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: 12 February 2022

Received in revised form:

28 August 2022

Accepted: 30 August 2022

Published online: 24 June 2023

Keywords:

Fatty acid,

Late season drought stress,

Linolenic acid,

Oil percentage.

ABSTRACT

Drought stress is one of the most important factors in reducing yield and seed quality of rapeseed. The present study chiefly tries to evaluate the effect of application of brassinosteroid on seed yield, oil content, oil yield, and fatty acids profile of rapeseed genotypes under late-season water deficit stress considered. A factorial split-plot test has been conducted in a randomized complete blocks design for two cultivation years (2017-2019) in Karaj, Iran. Experimental treatments include two levels of brassinosteroid (i.e., 0 (control) and 0.1 μmol) and two levels of irrigation (full irrigation (control) and withholding irrigation from flowering stage) as factorial in the main plots, and rapeseed genotypes (Nafis, Ahmadi, Okapi, Nima, and Niloufar) as subplots. The levels of oleic acid and linoleic acid in the conditions of application of brassinosteroids have been 0.7% and 11% in full irrigation conditions and 1.1% and 6.4% in withholding irrigation conditions, respectively, compared to the control on the other hand, the use of brassinosteroids in withholding irrigation conditions reduce palmitic acid by 14% compared to the control. Okapi genotype has had the highest and lowest erucic acid and grain yield in irrigation conditions, respectively. Under drought stress conditions, the highest seed yield (3112.3 kg/ha) and the lowest amount of erucic acid (0.26%) belonged to Niloufar genotype. The use of brassinosteroids in both irrigation treatments improve the quality of fatty acids and Niloufar cultivar is recommended in both irrigation conditions

Cite this article: Rafati Alashti, M., Kazemi, Sh., & Sadat Khayat Moghadam, M. (2023). Evaluation the Effect of Brassinosteroid on The Improvement of Oil Quality and Yield of Rapeseed Genotypes under Late-Season Drought Stress. *Journal of Crops Improvement*, 25 (2), 331-347. DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2022.339021.2681>





بررسی تأثیر براسینواستروئید بر بهبود کیفیت روغن و عملکرد ژنوتیپ‌های کلزا تحت شرایط تنش خشکی

مهسا رفعتی آلاشتی^۱ | شهریار کاظمی^۲ | مزده سادات خیاط مقدم^۳ ✉

۱. گروه علوم کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران، رایانامه: m.alashti@pnu.ac.ir

۲. گروه علوم کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران، رایانامه: Sh.kazemi@pnu.ac.ir

۳. نویسنده مسئول، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود، سمنان، ایران، رایانامه: Moghadam.mojde@shahroodut.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تنش خشکی یکی از مهم‌ترین عوامل در کاهش عملکرد و کیفیت بذر کلزا می‌باشد. ارزیابی اثر کاربرد براسینواستروئید بر عملکرد دانه، محتوای روغن و پروفایل اسیدهای چرب ژنوتیپ‌های کلزا تحت تنش خشکی آخر فصل به‌عنوان هدف اصلی مطالعه حاضر در نظر گرفته شد. پژوهشی به‌صورت فاکتوریل کرت‌خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی طی دو سال زراعی (۹۷-۱۳۹۶ و ۹۸-۱۳۹۷) در کرج اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل براسینواستروئید (صفر و ۰/۱ میکرومولار) و آبیاری (معمول و قطع آبیاری بعد از گلدهی) به‌صورت فاکتوریل در کرت‌های اصلی و ژنوتیپ‌های کلزا (نفیس، احمدی، اکاپی، نیما و نیلوفر) در کرت‌های فرعی قرار گرفتند. میزان اولئیک‌اسید و لینولئیک‌اسید در شرایط کاربرد براسینواستروئید به‌ترتیب در شرایط آبیاری کامل ۰/۷ و ۱۱ درصد و در شرایط قطع آبیاری ۱/۱ و ۶/۴ درصد نسبت به تیمار شاهد بیش‌تر بود. کاربرد براسینواستروئید در شرایط قطع آبیاری منجر به کاهش ۱۴ درصدی پالمیتیک‌اسید نسبت به شاهد گردید. ژنوتیپ اکاپی در شرایط آبیاری به‌ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین اروسیک‌اسید و عملکرد دانه را داشت. این در حالی بود که تحت شرایط تنش خشکی بیش‌ترین میزان عملکرد دانه (۳/۱۱۲ کیلوگرم‌درهکتار) و کم‌ترین میزان اروسیک‌اسید (۲۶/۰ درصد) مربوط به ژنوتیپ نیلوفر بود. کاربرد براسینواستروئید منجر به بهبود کیفیت اسیدهای چرب گردید و در هر دو شرایط آبیاری ژنوتیپ نیلوفر قابل توصیه است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۶/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۰۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۴/۰۳

کلیدواژه‌ها:

اسید چرب،

لینولئیک‌اسید،

تنش خشکی آخر فصل،

درصد روغن.

استناد: رفعتی آلاشتی، مهسا؛ کاظمی، شهریار و خیاط مقدم، مزده سادات (۱۴۰۲). بررسی تأثیر براسینواستروئید بر بهبود کیفیت روغن و عملکرد ژنوتیپ‌های کلزا تحت شرایط تنش خشکی. *به‌زراعی کشاورزی*، ۲۵ (۲)، ۳۳۱-۳۴۷. DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2022.339021.2681>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2022.339021.2681>

۱. مقدمه

کلزا با نام علمی *Brassica napus* L. یکی از گیاهان دانه روغنی مهم در جهان است (Eyni-Nargeseh *et al.*, 2020). کلزا پس از نخل روغنی و سویا، سومین محصول مهم دانه‌های روغنی در جهان است و به‌عنوان یک محصول جایگزین برای تناوب زراعی مبتنی بر غلات استفاده می‌شود (Hamzei & Soltani, 2012). علاوه بر این، کلزا به‌دلیل راندمان مصرف آب بالا و تحمل نسبی به تنش خشکی، محصولی مناسب برای کشت در مناطق خشک و نیمه‌خشک است (Al-Barrak, 2006). اهداف اصلی در بهبود محصولات دانه‌های روغنی، افزایش عملکرد دانه و روغن، کیفیت روغن برای مصارف خوراکی و صنعتی و همچنین توسعه واریته‌هایی متناسب با سیستم‌های مختلف زراعی دارای مقاومت یا تحمل به تنش‌های زیستی و غیرزیستی است (Rathnakumar & Sujatha, 2022).

خشکی یکی از مهم‌ترین عوامل تنش‌زای غیرزنده است که بر رشد، متابولیسم و عملکرد گیاهان اثر منفی برجای می‌گذارد (Bhati *et al.*, 2015). سطح وسیعی از زمین‌های کشاورزی ایران در مناطقی واقع شده‌اند که از لحاظ تأمین آب لازم برای زراعت کلزا دچار کمبود می‌باشند. توزیع نامناسب بارندگی و توقف آن قبل از تکمیل رشد کلزا از تهدیدهای اصلی خشکی جهت کشت کلزا در ایران است (Khodabin *et al.*, 2020).

۲. پیشینه پژوهش

مراحل گلدهی و خورجین‌دهی حساس‌ترین مراحل به تنش خشکی محسوب می‌شود (خیاط مقدم و همکاران، ۱۴۰۰ الف؛ Khodabin *et al.*, 2021). در اثر خشکی از مرحله ساقه‌رفتن تا گلدهی، خورجین‌های نارس کلزا به زمین می‌ریزد، انتقال مواد فتوسنتزی از ساقه به دانه متوقف شده و در نتیجه عملکرد دانه کاهش می‌یابد (Khan *et al.*, 2010). 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 (Tohidi-moghadam *et al.*, 2011). گزارش شده است که تنش خشکی در مرحله گلدهی به ترتیب منجر به کاهش ۱۱ و هشت درصدی اولئیک‌اسید و لینولئیک و افزایش ۱۰ درصدی لینولینیک‌اسید در کلزا شد (Khodabin *et al.*, 2021). پژوهش‌گران دیگری کاهش لینولئیک‌اسید در گونه‌های براسیکا (Enjalbert *et al.*, 2017) و افزایش اولئیک‌اسید در کلزا (Jabbari Khosh Kholgh & Shirani Rad, 2017) را گزارش کردند.

چندین روش زراعی و فیزیولوژیکی جهت کاهش اثرات نامطلوب تنش خشکی و القای تحمل به تنش خشکی در گیاهان به کار گرفته شده است. استفاده از هورمون‌های گیاهی یکی از استراتژی‌های امیدوارکننده و عملی برای افزایش بهره‌وری محصول در شرایط تنش است (Chen *et al.*, 2018; Javid *et al.*, 2022). براسینواستروئیدها^۱ (BRs) در تنظیم عملکردهای متابولیکی مختلف مرتبط با فرایندهای مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و رشدی گیاهان نقش دارند (Sidhu & Bali, 2022) و همچنین باعث ایجاد مقاومت در برابر تنش‌های غیرزیستی در گیاهان مختلف می‌شود (Bajguz & Hayat, 2009; Xia *et al.*, 2009; Vardhini, Sujatha & Rao, 2011; Talaat & Shawky, 2013). براسینولید، کاسترون و ۲۴-اپی‌براسینولید مهم‌ترین و شناخته‌شده‌ترین ترکیبات BR هستند. این اجزا معمولاً در بافت گیاهی غلظت بسیار کمی دارند (Ciura & Kruk, 2018). شواهدی وجود دارد که نشان می‌دهد تنظیم‌کننده‌های رشد به‌طور برون‌زا می‌توانند تحمل به تنش‌های مختلف مانند خشکی، تنش فلزات سنگین و همچنین تنش شوری را در گیاهان بهبود بخشند (Anjum *et al.*, 2016; Shahzad *et al.*, 2018; Tanveer *et al.*, 2018). BRs تولید روغن

سرخارگل بنفش^۱ را تحت تنش خشکی بهبود بخشید (Hosseinpour *et al.*, 2020). 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. سایر پژوهش‌گران دریافته‌اند که براسینواستروئید در کلزا باعث افزایش تجمع روغن دانه می‌شود (Pokotylo *et al.*, 2014). همچنین گزارش شده است که براسینواستروئید منجر به افزایش عملکرد دانه شد (Anjum *et al.*, 2011; Gruszka, 2020; Yue *et al.*, 2019).

ارزیابی تأثیر براسینواستروئید به‌عنوان یک‌شبه هورمون در کاهش خسارت‌های ناشی از تنش بر صفات عملکرد دانه، محتوای روغن و پروفایل اسیدهای چرب ژنوتیپ‌های مختلف کلزا در منطقه کرج، با توجه به پتانسیل کشت این محصول در این منطقه و تعیین ژنوتیپ مناسب، تحت تنش خشکی آخر فصل به‌عنوان هدف اصلی مطالعه حاضر در نظر گرفته شده است.

۳. روش‌شناسی پژوهش

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 در دو سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶ و ۹۸-۱۳۹۷ در کرج 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 ارائه شده است (جدول ۱).

جدول ۱. تغییرات میانگین دما و بارندگی ایستگاه هواشناسی منطقه کرج در سال‌های زراعی ۹۷-۱۳۹۶ و ۹۸-۱۳۹۷

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	۲۳/۸	۱۶/۲	۹	۷/۳	۴/۸	۵/۸	۹/۲	۱۴/۸	۲۱/۴	۲۶/۹

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 به بعد (سیستم کدبندی BBCH^۲ کد شماره ۶۵) و عامل براسینواستروئید (از نوع ۲۴-اپی براسینولید) (EBR, Sigma-Aldrich, USA) در دو سطح، با غلظت صفر و ۰/۱ میکرومولار (Ahmed *et al.*, 2012; Shu *et al.*, 2016) به‌صورت فاکتوریل به‌عنوان کرت اصلی و ژنوتیپ‌های کلزا 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 گاورو شدن به‌وسیله گاوآهن برگردان‌دار شخم و سپس دیسک و ماله زده شد. هر کرت آزمایشی، شامل شش ردیف کاشت به طول شش متر با فاصله ۳۰ سانتی‌متر بود که دو ردیف کناری به‌عنوان حاشیه در نظر گرفته شدند. فاصله بین کرت‌های اصلی ۱۸۰ سانتی‌متر، فاصله بین

1. *Echinacea purpurea* L.

2. Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie

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 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 داده شدند. پخش علف‌کش 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 شدند. پس از اجرای آزمایش مطابق نقشه کاشت، آبیاری به روش نشستی (جوی پشته) صورت گرفت و زمان‌بندی آبیاری براساس تغییرات روزانه رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه با استفاده از دستگاه TDR^۱ (Germany, TRYME) (لوله‌های پروب دستگاه را در عمق ۱۰۰ سانتی‌متری خاک در قسمت بالایی 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)^۲ و نقطه پژمردگی دائم (PWP)^۳ 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 گردید.

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

MAD^۴ 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 θ محتوای رطوبت حجمی اندازه‌گیری‌شده توسط TDR می‌باشد.

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

در رابطه (۲)، ASW آب قابل‌دسترس (قابل‌استفاده)، Rz عمق توسعه ریشه (۱۰۰ سانتی‌متر) (Allen et al., 1998)) و عدد ۱۰ 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.

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش در عمق‌های ۰-۳۰ و ۳۰-۶۰ سانتی‌متر در طول فصل رشد

عمق نمونه‌برداری (cm)	واکنش گل اشباع	هدایت الکتریکی خاک (dS.cm ⁻¹)	کربن آلی (%)	فسفر قابل‌جذب (mg.kg ⁻¹)	پتاسیم قابل‌جذب (mg.kg ⁻¹)	آهن قابل‌جذب (mg.kg ⁻¹)	نیتروژن 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)	مگنز قابل‌جذب (mg.kg ⁻¹)	روی قابل‌جذب (mg.kg ⁻¹)	مس قابل‌جذب (mg.kg ⁻¹)	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

کنترل آفات به‌ویژه شته مومی با استفاده از سموم کنفیدور (۲۵۰ میلی‌لیتر در هکتار) و دیمتوات (۱۵۰ میلی‌لیتر در هکتار)

1. Time-Domain Reflectometry
2. Field Capacity
3. Permanent wilting point
4. Maximum Allowable Depletion

به‌صورت ترکیبی صورت گرفت. محلول براسینواستروئید با حل در اتانول و سپس رقیق شدن با آب MilliQ (اتانول: آب $(V/V)=1000:1$) تهیه شد. محلول پاشی براسینواستروئید تنها در یک مرحله، 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) انجام شد. بوته‌های شاهد به‌طور هم‌زمان با آب MilliQ حاوی نسبت مشابه اتانول اسپری شدند (Ahammed *et al.*, 2012). جهت تعیین عملکرد دانه، در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک مساحتی به‌اندازه $4/8$ مترمربع از هر کرت آزمایشی کف‌بر شد. سپس با استفاده از کمباین مخصوص، دانه‌ها از بوته جدا شد. بعد از قهوه‌ای شدن پشت غلاف، هر دو روز یک‌بار از غلاف‌ها نمونه‌برداری شد و وزن تر بذر آن‌ها اندازه‌گیری و به‌مدت ۴۸ ساعت در آون در دمای 70 درجه سانتی‌گراد قرار داده شد تا وزن خشک به‌دست آمد. به این طریق میزان رطوبت بذر هر دو روز یک‌بار محاسبه شد. این روند تا رسیدن بذر به 12 درصد ادامه یافت. زمانی که رطوبت بذر به 12 درصد رسید، عملکرد بذر محاسبه شد. جهت تعیین درصد روغن دانه، از هر تیمار پنج گرم دانه توزین و پس از خشک کردن در آون 72 درجه به‌مدت ۴۸ ساعت، نمونه‌ها آسیاب شدند و سپس با استفاده از دستگاه NMR (20 amq, Bruker, Germany) درصد روغن اندازه‌گیری شد. میزان گلوکوزینولات دانه توسط دستگاه اسپکتروفتومتر (Varian Cary Win UV 6000i, Australia) اندازه‌گیری شد (Makkar *et al.*, 2007). برای اندازه‌گیری و تعیین اسیدهای چرب موجود در روغن دانه از روش کروماتوگرافی گازی استفاده شد (Damirchi *et al.*, 2005).

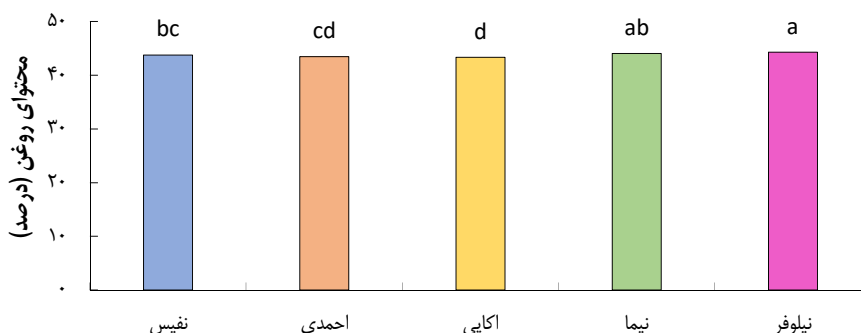
در پایان پس از اطمینان از مفروضات آزمایشی، آزمون کلموگروف اسمیرنوف^۱ جهت نرمال بودن داده‌های هر سال آزمایش انجام شد. از آزمون بارتلت^۲ جهت تست یکنواختی واریانس‌ها استفاده گردید (جدول ۴) و بعد از اثبات همگن بودن واریانس‌ها، داده‌های آزمایش با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS (نسخه ۹/۴) تجزیه واریانس مرکب شدند. برای مقایسه میانگین در سطح پنج درصد اثرات متقابل از رویه برش‌دهی استفاده شد.

۴. یافته‌های پژوهشی

۴.۱. محتوای روغن

جدول تجزیه واریانس آزمایش نشان داد که اثرات ساده آبیاری، براسینواستروئید و ژنوتیپ در سطح یک درصد و همچنین اثر متقابل براسینواستروئید×آبیاری بر صفت محتوای روغن در سطح پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). 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 $43/74$ درصد به‌دست آمد که نسبت به شاهد $2/40$ درصد افزایش داشت. ژنوتیپ‌های مختلف کلزا به‌دلیل ماهیت ژنتیکی متفاوت واکنش متفاوتی نشان دادند، به‌طوری‌که بالاترین محتوای روغن در ژنوتیپ نیلوفر ($44/3$ درصد) و کم‌ترین آن در ژنوتیپ اکاپی ($43/4$ درصد) مشاهده شد (شکل ۱).

1. Nuclear Magnetic Resonance
2. Kolmogorov-Smirnov test
3. Bartlett Test



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 دانه گلرنگ 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; Zhao *et al.*, 2017). 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. سایر پژوهش‌گران دریافته‌اند که براسینواستروئید در کلزا باعث افزایش تجمع روغن دانه می‌شود (Pokotylo *et al.*, 2014).

جدول ۳. تجزیه مرکب اثر براسینواستروئید بر عملکرد و صفات فیزیولوژیکی ژنوتیپ‌های کلزا تحت شرایط قطع آبیاری

میانگین مربعات									
منابع تغییرات	درجه آزادی	درصد روغن	عملکرد دانه	اوانیک اسید	لینولینیک اسید	پالمیتیک اسید	اروسیک اسید	گلوکزینولات	
سال	۱	۴/۲ ns	۲۳۹۳۳۰/۱**	۰/۱۴ ns	۱/۱۷ ns	۳/۸۷ ns	۰/۰۹ ns	۲/۲۵ ns	
تکرار درون سال (خطا)	۴	۰/۷۲	۲۲۵۷۶۰/۷	۰/۰۷۷	۵/۲۷	۰/۹۹	۰/۰۴	۱/۵	
آبیاری	۱	۳۹/۵**	۳۶۷۳۶۰۰۹**	۱۹/۷۱**	۵۴/۸**	۱۷/۵۹**	۵/۱۲**	۳۳۵/۰۸**	
سال × آبیاری	۱	۰/۸۱ ns	۶۶۵۸۸۱/۰۱**	۰/۰۹ ns	۰/۱۹۶ ns	۱/۱۴ ns	۰/۰۲ ns	۱/۳۴ ns	
براسینواستروئید	۳	۱۲**	۱۱۸۲۹۶۳۶**	۱۰/۰۱**	۹۰/۹۷**	۴۱/۰۳**	۲/۷**	۸۵/۵۱**	
سال × براسینواستروئید	۳	۱/۲ ns	۱۶۹۵۱۶/۵ ns	۰/۲۵ ns	۰/۳۱ ns	۲/۰۱ ns	۰/۰۱ ns	۴/۰۱ ns	
براسینواستروئید × آبیاری	۳	۴/۱*	۱۷۰۸۱۳۷/۳**	۰/۴۲*	۴/۹۷**	۱/۷۹ ns	۰/۱۱**	۲۷/۷**	
سال × براسینواستروئید × آبیاری	۳	۰/۳۶ ns	۳۰۵۹۶/۹ ns	۰/۱۹ ns	۰/۲۱ ns	۰/۶۷ ns	۰/۰۱ ns	۱/۷ ns	
سال × آبیاری × براسینواستروئید (خطا ۳)	۲۸	۰/۵۴	۴۰۳۱۹/۵۹	۰/۰۶۸	۳/۴۲	۰/۶۱	۰/۰۰۸۱	۱/۱	
ژنوتیپ	۲	۳/۶**	۲۴۲۲۹۱۳**	۳/۰۰۱**	۴/۲۸**	۰/۳۲ ns	۱/۹۵**	۳۶/۰۵**	
سال × ژنوتیپ	۲	۰/۲۷ ns	۳۹۷۷۱/۰۹ ns	۰/۰۹۴ ns	۰/۱۹ ns	۰/۱۴ ns	۰/۰۰۴ ns	۱/۱۴ ns	
آبیاری × ژنوتیپ	۲	۱/۱۱ ns	۶۱۸۳۹۰**	۰/۲۳*	۱/۸۹*	۰/۴۱ ns	۰/۵۴**	۳/۴۱*	
سال × آبیاری × ژنوتیپ	۲	۰/۳۱ ns	۶۰۷۵۲/۴ ns	۰/۱۱ ns	۰/۸۶ ns	۰/۱۶ ns	۰/۰۰۳ ns	۱/۷۲ ns	
براسینواستروئید × ژنوتیپ	۶	۰/۶ ns	۳۹۳۳۲۱ ns	۰/۰۷۴ ns	۰/۳۷ ns	۰/۳۱ ns	۰/۰۱ ns	۲/۳۴ ns	
سال × براسینواستروئید × ژنوتیپ	۶	۰/۴۴ ns	۱۰۱۲۷/۴۱ ns	۰/۰۴۵ ns	۰/۶۲ ns	۰/۱۱ ns	۰/۰۰۶ ns	۱/۴۸ ns	
آبیاری × براسینواستروئید × ژنوتیپ	۶	۰/۰۹ ns	۱۴۵۷۲۸/۶۸ ns	۰/۱۲ ns	۰/۴۵ ns	۰/۵۷ ns	۰/۰۰۹ ns	۲/۰۷ ns	
سال × آبیاری × براسینواستروئید × ژنوتیپ	۶	۰/۱۹ ns	۷۵۴۹۷/۶ ns	۰/۰۹۱ ns	۰/۶۷ ns	۰/۲۵ ns	۰/۰۱۳ ns	۱/۳۱ ns	
خطا ۳	۶۴	۰/۳۱	۱۹۳۶۲/۱۶	۰/۰۱۱	۱/۰۱	۰/۳	۰/۰۰۷	۰/۵	
ضریب تغییرات (%)		۲/۲۷	۱۳/۷۱	۲/۱۶	۴/۹	۷/۶۴	۵/۴۱	۱۱/۸۱	۶/۳

ns = به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال پنج و یک درصد و عدم معنی‌داری. *, **, و *** = به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال پنج و یک درصد و عدم معنی‌داری.

جدول ۴. نتایج آزمون بارتلت

صفات	درصد روغن	عملکرد دانه	اولنیک‌اسید	لینولنیک‌اسید	لینولنیک‌اسید	پالمیتیک‌اسید	اروسیک‌اسید	گلوکوزینولات
Chi-square	۱/۱۲	۱۰۹	۰/۲۹	۰/۸۷	۲۰/۳۴	۱/۲۹	۰/۱۱	۱/۶
P Value	۰/۳۳	۰/۱۱	۰/۴۲	۰/۰۷	۲/۳۲	۰/۱۱	۰/۰۹۲	۰/۴۵

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

آبیاری	براسینواستروئید (میکرومول)	محتوای روغن (درصد)	عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)	اولنیک‌اسید (درصد)	لینولنیک‌اسید (درصد)	پالمیتیک‌اسید (درصد)	گلوکوزینولات (میکرومول بر گرم کتجاله)
آبیاری کامل	صفر	۴۴/۳±۰/۱۵ a	۳۴۳۵±۸۳/۰۵b	۶۴/۳۵±۰/۰۶ b	۱۶/۵±۰/۱۵ b	۴/۶±۰/۰۳ a	۱۸/۰۲±۰/۳۷ a
	۰/۱	۴۴/۶±۰/۰۹ a	۳۸۸۵/۴±۷۵/۲a	۶۴/۸۴±۰/۱۱ a	۱۸/۴۷±۰/۱۸ a	۴/۱±۰/۰۲ b	۱۷/۳±۰/۲۴ a
	LSD	۰/۳۴	۱۹۸/۲۶	۰/۱۹	۰/۴۴	۰/۰۵۸	۰/۸۱
قطع بیاری	صفر	۴۲/۶۹±۰/۱۲ b	۲۱۳۴/۵±۱۳۲/۶b	۶۳/۴±۰/۰۹ b	۱۵/۶±۰/۰۲ b	۵/۶±۰/۰۶ a	۲۳/۲±۰/۳۵a
	۰/۱	۴۳/۷۴±۰/۱۴a	۳۰۰۱/۳±۹۲/۶a	۶۴/۱±۰/۱۲ a	۱۶/۷۱±۰/۱۶ a	۴/۸۳±۰/۰۷ b	۲۰/۵۶±۰/۳ b
	LSD	۰/۲۹	۲۶۲/۶	۰/۲۴	۰/۴	۰/۰۵	۱/۲۱

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

۲.۴. عملکرد دانه

بررسی تأثیر تیمارهای آزمایش بر عملکرد دانه نشان داد که اثرات ساده سال، آبیاری، براسینواستروئید و ژنوتیپ در سطح یک درصد بر عملکرد دانه کلزا معنی‌دار بود. بررسی برهم‌کنش سال × آبیاری، براسینواستروئید × آبیاری و آبیاری × ژنوتیپ نیز در سطح یک درصد بر این صفت معنی‌دار بود (جدول ۳). مقایسه میانگین آبیاری × براسینواستروئید نشان داد که بیش‌ترین عملکرد دانه در شرایط آبیاری کامل در تیمار براسینواستروئید ۰/۱ میکرومولار با میانگین ۳۸۸۵/۴ کیلوگرم در هکتار حاصل شد که نسبت به شاهد ۱۱/۵۷ درصد افزایش را نشان داد. در شرایط قطع آبیاری در مرحله ۵۰ درصد گلدهی، بیش‌ترین عملکرد دانه با میانگین ۳۰۰۱/۴ کیلوگرم در هکتار در براسینواستروئید ۰/۱ میکرومولار به‌دست آمد که نسبت به شاهد ۲۸/۸۸ درصد افزایش را نشان داد (جدول ۵). مقایسه میانگین برهم‌کنش دوگانه سال × آبیاری بر این صفت نشان داد قطع آبیاری در سال اول و دوم زراعی به‌ترتیب منجر به کاهش ۳۹/۴۶ و ۱۸/۹۳ درصدی نسبت به شاهد شد (جدول ۶).

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

سال	آبیاری	اروسیک‌اسید (درصد)	عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)
سال اول	آبیاری کامل	۰/۲۴±۰/۰۱۳ b	۳۴۳۵±۷۰/۴ a
	قطع آبیاری	۰/۳۱±۰/۰۱۵ b	۲۳۵۲±۱۳۷/۵ b
	LSD	۰/۳۷	۱۶۹/۷۶
سال دوم	آبیاری کامل	۰/۱۷±۰/۰۰۸ a	۳۸۸۵/۴±۹۷/۸a
	قطع آبیاری	۰/۲±۰/۰۱ a	۲۷۸۴/۷±۱۳۰/۳ b
	LSD	۰/۴۲	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.

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 ۴۰۴۴/۷ کیلوگرم در هکتار بیش‌ترین عملکرد دانه را داشت که نسبت به ژنوتیپ شاهد ۱۰/۷۴ 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. تنش خشکی در مرحله گلدهی موجب کاهش ۳۸/۰۹، ۴۴/۰۴، ۸۶/۲۹، ۳۴/۱۹ و ۲۹/۹۵ درصدی عملکرد دانه به ترتیب در ژنوتیپ‌های نفیس، احمدی، اکاپی، نیما و نیلوفر 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 فوتوسیمیلات‌ها می‌شود (Yue et al., 2019). پژوهش‌گران بهبود قابل‌توجهی در عملکرد گیاهان ذرت پس از کاربرد خارجی براسینواستروئید تحت تنش خشکی گزارش کردند. آن‌ها پس از تیمار براسینواستروئید متوجه افزایش تعداد دانه در بوته و همچنین عملکرد دانه در بوته شدند (Talaat et al., 2015). همچنین افزایش عملکرد ذرت در گیاهان تیمار شده با براسینواستروئید که تحت تنش خشکی رشد کرده بودند، گزارش کردند. آن‌ها متوجه افزایش معنی‌داری در تعداد دانه، عملکرد بیولوژیکی در بوته و عملکرد دانه در بوته پس از کاربرد براسینواستروئید تحت تنش خشکی شدند (Anjum et al., 2011). اعمال تنش خشکی بر روی عملکرد و اجزای عملکرد در ارقام کلزا تأثیرگذار بود (Khayat Moghadam et al., 2021b). در تحقیقی دیگر اعمال تنش خشکی به دلیل کاهش فعالیت فتوسنتزی و همچنین کاهش کربوهیدرات و سایر قندها منجر به کاهش عملکرد در گیاه ذرت شد (Anjum et al., 2017).

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

آبیاری	ژنوتیپ	عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)	اولئیک‌اسید (درصد)	لینولئیک‌اسید (درصد)	پالمیتیک‌اسید (درصد)	اروسیک‌اسید (درصد)	گلوکوزینولات (میکرومول بر گرم کنجاله)
	نفیس	۳۵۲۱±۱۴۳/۴ bc	۶۴/۱۹±۰/۱۲ b	۱۶/۸۴±۰/۴۵ a	۴/۴۱±۰/۱ b	۰/۲۰±۰/۰۱ a	۱۸/۱۲±۰/۳۹ a
	احمدی	۳۴۲۷/۸±۹۷/۱۲ c	۶۴/۵۲±۰/۱۶ ab	۱۶/۷۶±۰/۵۳ a	۴/۵±۰/۰۷ a	۰/۲۱±۰/۰۱۱ a	۱۸/۲۵±۰/۲۹ a
آبیاری کامل	اکاپی	۳۶۵۲/۴±۱۰۴ bc	۶۴/۶۱±۰/۱۵ a	۱۶/۹۷±۰/۵۶ a	۴/۲۹±۰/۰۷۴ c	۰/۱۸±۰/۰۱ ab	۱۸/۵۳±۰/۲۶ a
	نیما	۳۸۰۹/۷±۱۱۵/۸ ab	۶۴/۸±۰/۱۶ a	۱۷/۲۹±۰/۴۸ a	۴/۱۳±۰/۱ d	۰/۱۷±۰/۰۱۱ b	۱۶/۷۷±۰/۳۱ b
	نیلوفر	۴۰۴۴/۷±۱۴۷/۲ a	۶۴/۸۲±۰/۱۵ a	۱۷/۲۷±۰/۵۱ a	۴/۳±۰/۱۳ C	۰/۱۶±۰/۰۲ b	۱۶/۵۵±۰/۶ b
	LSD	۳۱۴/۵۸	۰/۳۹	۰/۷	۰/۰۹۱	۰/۰۳۶	۱/۲۸
	نفیس	۲۵۴۹/۷±۳۳۴ bc	۶۳/۶۹±۰/۲ b	۱۵/۷±۰/۳ b	۵/۰۹±۰/۱۲ c	۰/۲۸±۰/۰۱۸ bc	۲۱/۸۶±۰/۷۳ b
	احمدی	۲۳۷۹/۲±۱۱۹ c	۶۲/۵۹±۰/۱۷ b	۱۵/۴۲±۰/۴۱ b	۵/۵۷±۰/۱۱ b	۰/۳۰±۰/۰۱۶ b	۲۳/۸۳±۰/۳۹ a
قطع آبیاری	اکاپی	۱۹۶۰/۵±۱۵۴/۲ d	۶۳/۱۵±۰/۱۶ c	۱۴/۷۳±۰/۴۴ c	۵/۷۴±۰/۱ a	۰/۳۷±۰/۰۱۴ a	۲۲/۸۹±۰/۴۶ a
	نیما	۲۸۳۹±۱۸۹/۴ ab	۶۴/۱۲±۰/۱۵ a	۱۵/۹۷±۰/۳۵ ab	۴/۷±۰/۱۱ e	۰/۲۴±۰/۰۱۹ d	۲۰/۹۶±۰/۵ b
	نیلوفر	۳۱۱۲/۳±۲۰۵/۶ a	۶۴/۲۸±۰/۱۸ a	۱۶/۵۵±۰/۴۳ a	۴/۹±۰/۱۲ d	۰/۲۶±۰/۰۲ cd	۱۹/۸۸±۰/۴۳ c
	LSD	۴۱۵/۷	۰/۳۲	۰/۶۳	۰/۰۸۳	۰/۰۳۲	۰/۹۶

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

۳.۴. اولئیک‌اسید

بررسی تأثیر تیمارهای آزمایش بر صفت اولئیک‌اسید نشان داد که اثرات ساده آبیاری، براسینواستروئید و ژنوتیپ در سطح یک درصد معنی‌دار بود. بررسی برهم‌کنش براسینواستروئید × آبیاری و آبیاری × ژنوتیپ نیز در سطح پنج درصد بر این صفت معنی‌دار بود (جدول ۳). مقایسه میانگین آبیاری × براسینواستروئید نشان داد که بیشترین میزان اولئیک‌اسید در هر دو شرایط آبیاری کامل و قطع آبیاری در تیمار براسینواستروئید ۰/۱ میکرومولار به ترتیب با میانگین ۶۴/۸۴ و ۶۴/۱ درصد حاصل شد که نسبت به شاهد ۰/۷۶ و ۱/۱ درصد افزایش را نشان داد (جدول ۵). مقایسه میانگین آبیاری × ژنوتیپ نشان داد که بیشترین درصد اولئیک‌اسید در شرایط آبیاری کامل، در ژنوتیپ نیلوفر (۶۴/۸۲ درصد) مشاهده شد که با دو

ژنوتیپ نیما و اکاپی در یک گروه آماری قرار داشتند و کم‌ترین درصد اولئیک‌اسید در ژنوتیپ نفیس با میانگین ۶۴/۱۹ درصد حاصل شد. در شرایط قطع آبیاری نیز ژنوتیپ نیلوفر با ۶۴/۲۸ درصد بیش‌ترین اولئیک‌اسید را داشت که با ژنوتیپ نیما در یک گروه آماری قرار داشت و کم‌ترین درصد اولئیک‌اسید در ژنوتیپ اکاپی با میانگین ۶۳/۱۵ درصد حاصل شد. قطع آبیاری در ژنوتیپ‌های نفیس، احمدی، اکاپی، نیما و نیلوفر به‌ترتیب موجب کاهش ۰/۷۸، ۱/۴۹، ۲/۳۱، ۱/۰۶ و ۰/۸۴ درصدی اولئیک‌اسید شد (جدول ۷).

نتایج نشان داد که تیمار براسینواستروئید ۰/۱ میکرومولار در شرایط آبیاری و قطع آن باعث بهبود اولئیک‌اسید شد. افزایش اسیدهای چرب با استفاده از براسینواستروئید به‌دلیل نقش آن‌ها در بسیاری از فرایندها مانند فتوسنتز، نسبت‌های کلروفیل a/b و $NADPH/NADP^+$ ، فعالیت ریبولوز ۱-۵- بیس فسفات کربوکسیلاز/اکسیژناز و NADP وابسته به ملات دهیدروژناز است (Shahzad *et al.*, 2018). پژوهش‌گران گزارش کردند که تنش خشکی باعث کاهش اولئیک‌اسید در ژنوتیپ‌های کلزا شد (Farahani *et al.*, 2019; Hatzig *et al.*, 2018).

۴.۴. لینولئیک‌اسید

نتایج تجزیه مرکب داده‌ها نشان داد که اثر ساده آبیاری، براسینواستروئید و ژنوتیپ و همچنین برهم‌کنش براسینواستروئید×آبیاری در سطح یک درصد بر صفت لینولئیک‌اسید معنی‌دار بود. برهم‌کنش آبیاری×ژنوتیپ نیز در سطح پنج درصد بر این صفت معنی‌دار بود (جدول ۳). به‌طورکلی، براسینواستروئید در هر دو شرایط آبیاری موجب بهبود درصد لینولئیک‌اسید گردید. مقایسه میانگین آبیاری×براسینواستروئید نشان داد که بیش‌ترین لینولئیک‌اسید در شرایط آبیاری کامل در تیمار براسینواستروئید ۰/۱ میکرومولار (۱۸/۴۷ درصد) حاصل شد که نسبت به شاهد ۱۱/۹۳ درصد افزایش را نشان داد (جدول ۵). هم‌چنین در شرایط قطع آبیاری، بیش‌ترین لینولئیک‌اسید در تیمار براسینواستروئید (۱۶/۷۱ درصد) حاصل شد که نسبت به شاهد ۷/۱۱ درصد افزایش را نشان داد (جدول ۵). اعمال تنش منجر به کاهش لینولئیک‌اسید در تمامی ژنوتیپ‌ها شد. در شرایط آبیاری کامل، تمامی ژنوتیپ‌های موردبررسی در یک گروه آماری قرار داشتند، اما بیش‌ترین میزان لینولئیک‌اسید در ژنوتیپ نیما (۱۷/۲۹ درصد) مشاهده شد (جدول ۷). در شرایط تنش نیز بیش‌ترین میزان لینولئیک‌اسید در ژنوتیپ نیلوفر (۱۶/۵۵ درصد) به‌دست آمد که نسبت به ژنوتیپ شاهد (اکاپی) ۱۲/۳۵ درصد افزایش مشاهده شد (جدول ۷).

به‌طور مشابه، پژوهش‌گران دیگر نیز به تأثیر مثبت براسینواستروئید در شرایط تنش بر ترکیب اسیدهای چرب اذعان داشتند (Li *et al.*, 2012; Pokotylo *et al.*, 2014). در پژوهشی دیگر گزارش شد میزان لینولئیک‌اسید در گیاه کاملینا (*Camelina sativa* L.) به میزان ۳ تا ۳/۷ درصد تحت تنش خشکی کاهش یافت (Aghdasi *et al.*, 2021).

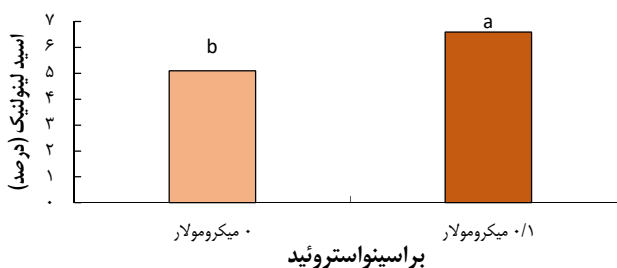
۵.۴. لینولینیک‌اسید

بررسی جدول آنالیز واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که تنها اثرات ساده آبیاری و براسینواستروئید بر صفت لینولینیک‌اسید در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). در شرایط قطع آبیاری میزان لینولینیک‌اسید با میانگین ۶/۲۶ درصد بود که نسبت به شرایط آبیاری کامل (شاهد) ۱۳/۸۱ درصد افزایش داشت (شکل ۲).



شکل ۲. مقایسه میانگین اثر ساده آبیاری بر صفت لینولئیک اسید. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون براساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

کاربرد براسینواستروئید توانست میزان لینولئیک اسید را افزایش دهد، به طوری که در تیمار براسینواستروئید ۰/۱ میکرومولار میزان آن ۶/۶ درصد بود که نسبت به شاهد ۲۹/۴۱ درصد افزایش داشت (شکل ۳).



شکل ۳. مقایسه میانگین اثر ساده براسینواستروئید بر صفت لینولئیک اسید. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون براساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

به طوری که در شرایط قطع آبیاری مقدار لینولئیک اسید نسبت به تیمار آبیاری کامل بالاتر بود، با توجه به این که اسیدهای چرب غیراشباع از اسیدهای چرب اشباع شده به وجود می‌آیند (Tohidi-moghadam *et al.*, 2011)، به نظر می‌رسد این افزایش به دلیل افزایش کلی اسیدهای چرب اشباع باشد. پژوهش‌گران شاهد تغییر در الگوهای اسیدهای چرب در شرایط تنش خشکی، به ویژه در هزینه اولئیک اسید به نفع اسیدهای چرب اشباع نشده مانند لینولئیک اسید بودند (Aslam *et al.*, 2009). براسینواستروئید در بیوسنتز اسیدهای چرب شرکت می‌کند یا فرایندهایی را که مسئول انتقال یا ادغام اسیدهای چرب به غشاها هستند را کنترل می‌کند، که بر سیالیت غشا تأثیر می‌گذارد (Sadura & Janeczko, 2022). حفظ سطوح بالاتر اسیدهای چرب غیراشباع مانند لینولئیک اسید و لینولئیک بسیار مهم است (Li *et al.*, 2012) که براسینواستروئید بر آن مؤثر است.

۴.۶. پالمیتیک اسید

نتایج تجزیه مرکب داده‌ها نشان داد که اثرات ساده آبیاری، براسینواستروئید و ژنوتیپ و هم‌چنین برهم‌کنش براسینواستروئید × آبیاری و آبیاری × ژنوتیپ در سطح یک درصد بر صفت پالمیتیک اسید معنی‌دار بود (جدول ۳). مقایسه میانگین آبیاری × براسینواستروئید نشان داد که کم‌ترین پالمیتیک اسید در شرایط آبیاری کامل در تیمار براسینواستروئید ۰/۱ میکرومولار (۴/۱ درصد) حاصل شد که نسبت به شاهد ۱۲/۱۹ درصد کاهش را نشان داد. هم‌چنین در شرایط قطع آبیاری، کم‌ترین پالمیتیک اسید در تیمار براسینواستروئید (۴/۸۳ درصد) حاصل شد که نسبت به شاهد ۱۵/۹۴ درصد

کاهش را نشان داد (جدول ۵). اعمال تنش خشکی منجر به افزایش پالمیتیک‌اسید در تمامی ژنوتیپ‌ها شد. در شرایط آبیاری کامل، بیش‌ترین میزان پالمیتیک‌اسید در ژنوتیپ احمدی با میانگین ۴/۵ درصد و کم‌ترین آن در ژنوتیپ نیما با میانگین ۴/۱۳ درصد مشاهده شد. در شرایط قطع آبیاری نیز بیش‌ترین میزان پالمیتیک‌اسید در ژنوتیپ اکاپی (۵/۷۴ درصد) و کم‌ترین در ژنوتیپ نیلوفر (۴/۹ درصد) مشاهده شد (جدول ۷).

مطالعات دیگران نشان داد که براسینواستروئید به‌طور قابل‌توجهی باعث کاهش پالمیتیک‌اسید شد (Singh *et al.*, 2021). در شرایط تنش خشکی با افزایش میزان اسیدهای پالمیتیک در تمامی ارقام، کیفیت روغن کاهش یافت (Estaji & Niknam, 2020; Khodabin *et al.*, 2021).

۷.۴. اروسیک‌اسید

نتایج تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که اثرات ساده آبیاری و ژنوتیپ و هم‌چنین برهم‌کنش سال × آبیاری و آبیاری × ژنوتیپ در سطح یک درصد بر صفت اروسیک‌اسید معنی‌دار بود (جدول ۳). سال دوم آزمایش به‌دلیل بارندگی بالاتر مجموع عملکرد روغن را افزایش داد، به این علت در هر دو شرایط آبیاری، مقدار اروسیک‌اسید بالا بود، باین‌حال تنش خشکی موجب افزایش آن شد. قطع آبیاری در سال اول و دوم زراعی به‌ترتیب منجر به افزایش ۲۹/۱۶ و ۱۷/۶۴ درصدی اروسیک‌اسید نسبت به شاهد شد (جدول ۶). در آبیاری کامل، بیش‌ترین میزان اروسیک‌اسید در دو ژنوتیپ نفیس و احمدی به‌ترتیب با میانگین ۰/۲ و ۰/۲۱ درصد و کم‌ترین در ژنوتیپ نیلوفر و نیما به‌ترتیب با میانگین ۰/۱۶ و ۰/۱۷ درصد مشاهده شد. در شرایط قطع آبیاری نیز کم‌ترین میزان اروسیک‌اسید در ژنوتیپ نیما (۰/۲۴ درصد) حاصل شد که نسبت به شاهد (اکاپی) ۳۵/۱۳ درصد کاهش داشت (جدول ۷).

در ارقام مورد مطالعه، شرایط تنش خشکی منجر به افزایش محتوای اروسیک‌اسید شد که نشان‌دهنده تأثیر منفی تنش خشکی بر کیفیت روغن کلزا است (Konuskan *et al.*, 2019). در پژوهشی دیگر نیز تنش خشکی منجر به افزایش محتوای اروسیک‌اسید و کاهش محتوای اولئیک‌اسید و لینولئیک شد (Ashkiani *et al.*, 2020; Khodabin *et al.*, 2021).

۸.۴. گلوکوزینولات

بررسی تأثیر تیمارهای آزمایش بر صفت گلوکوزینولات نشان داد که اثرات ساده آبیاری، براسینواستروئید و ژنوتیپ در سطح یک درصد معنی‌دار بود. بررسی برهم‌کنش آبیاری × براسینواستروئید در سطح یک درصد و آبیاری × ژنوتیپ نیز در سطح پنج درصد بر این صفت معنی‌دار بود (جدول ۳). مقایسه میانگین آبیاری × براسینواستروئید نشان داد که بیش‌ترین میزان گلوکوزینولات در هر دو شرایط آبیاری کامل و قطع آبیاری در تیمار براسینواستروئید ۰/۱ میکرومولار به‌ترتیب با میانگین ۱۸/۰۲ و ۲۳/۲۱ میکرومول بر گرم کنجاله حاصل شد که نسبت به شاهد ۴/۱۶ و ۱۲/۸۸ درصد کاهش را نشان داد (جدول ۵). اعمال تنش منجر به افزایش گلوکوزینولات در تمامی ژنوتیپ‌ها شد. در شرایط آبیاری کامل، ژنوتیپ اکاپی با میانگین ۱۸/۵۳ میکرومول بر گرم کنجاله بیش‌ترین گلوکوزینولات را داشت که با دو ژنوتیپ نفیس و احمدی در یک گروه آماری قرار داشت (جدول ۷). در شرایط قطع آبیاری نیز بیش‌ترین میزان گلوکوزینولات در دو ژنوتیپ احمدی و اکاپی به‌ترتیب با میانگین ۲۳/۸۳ و ۲۲/۸۹ میکرومول بر گرم کنجاله به‌دست آمد و کم‌ترین میزان آن در ژنوتیپ نیلوفر با ۱۹/۸۸ میکرومول بر گرم کنجاله حاصل شد (جدول ۷).

براسینواستروئید محتویات گلوکوزینولات‌های آلیفاتیک اصلی شامل گلوکوبرین، گلوکورافانین و گلوکوروسین و

همچنین گلوکوزینولات‌های اندولیک گلوکوزینولات و نئوگلوکوبراسیسیین را کاهش داد (Guo *et al.*, 2013). تنش خشکی منجر به افزایش میزان گلوکوزینولات در کلزا (Khodabin *et al.*, 2021) و کلم چینی گردید (Shawon *et al.*, 2020). افزایش گلوکوزینولات باعث کاهش کیفیت و ارزش غذایی کلزا می‌شود که تحت تأثیر عوامل ارثی و محیطی است (Cartea & Velasco, 2008).

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

به‌طور کلی می‌توان چنین نتیجه گرفت که کاربرد براسینواستروئید در هر دو شرایط آبیاری با افزایش عملکرد دانه، لینولئیک و اولئیک‌اسید از یک‌سو و کاهش پالمیتیک‌اسید از سوی دیگر منجر به بهبود کیفیت و کمیت روغن در ارقام کلزا مورد مطالعه شد، اما میزان مؤثر بودن 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 اقلیم خشک و نیمه‌خشک است. اما در زمانی که پیش‌بینی‌های آب و هوایی نشان از کم‌آبی در بهار را دارد، با توجه به غالب بودن رقم اکاپی در کشت پاییزه کشور نسبت به سایر ارقام باید از انتخاب این رقم جهت کشت به‌دلیل دیررس بودن و برخورد دوران پرشدن دانه با شرایط گرم و کم‌آبی، خودداری نمود.

۶. تشکر و قدردانی

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

۷. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۸. منابع

- خیاط مقدم، مژده سادات؛ غلامی، احمد؛ شیرانی راد، امیرحسین؛ برادران فیروزآبادی، مهدی و عباس‌دخت، حمید (۱۴۰۰ الف). اثر سیلیکات پتاسیم و تنش خشکی آخر فصل بر خصوصیات فیزیولوژیکی کلزا، به‌زراعی کشاورزی، ۲۳ (۴)، ۷۷۶-۷۶۸. <https://doi.org/10.22059/jci.2021.306872.2424>
- خیاط مقدم، مژده سادات؛ غلامی، احمد؛ شیرانی راد، امیرحسین؛ برادران فیروزآبادی، مهدی و عباس‌دخت، حمید (۱۴۰۰ ب). بررسی صفات زراعی ژنوتیپ‌های بهاره کلزا در شرایط تنش خشکی آخر فصل و محلول پاشی سیلیکات پتاسیم. به‌زراعی کشاورزی، ۱۴ (۳)، ۶۶۳-۶۴۹. <https://doi.org/10.22077/escs.2020.2723.1787>

References

- Aghdasi, S., Agha Alikhani, M., Modarres-Sanavy, S. A. M., & Kahrizi, D. (2021). Exogenously used boron and 24-epibrassinolide improved oil quality and mitigate late-season water deficit stress in camelina. *Industrial Crops and Products*, 171, 113885.
- Ahamed, G. J., Gao, C. J., Ogwen, J. O., Zhou, Y. H., Xia, X. J., Mao, W. H., Shi, K., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2012.02.004>

- Al-Barrak, K. M. (2006). Irrigation interval and nitrogen level effects on growth and yield of canola (*Brassica napus* L.). *Scientific Journal of King Faisal University*, 7(1), 87-102.
- 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.
- Ashkiani, A., Sayfzadeh, S., Shirani Rad, A. H., Valadabadi, A., & Hadidi Masouleh, E. (2020). Effects of foliar zinc application on yield and oil quality of rapeseed genotypes under drought stress. *Journal of Plant Nutrition*, 43(11), 1594-1603.
- Aslam, M. N., Nelson, M. N., Kailis, S. G., Bayliss, K. L., Speijers, J., & Cowling, W. A. (2009). Canola oil increases in polyunsaturated fatty acids and decreases in oleic acid in drought-stressed Mediterranean-type environments. *Plant Breeding*, 128(4), 348-355.
- 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.
- Bajguz, A., & Hayat, S. (2009). Effects of brassinosteroids on the plant responses to environmental stresses. *Plant physiology and biochemistry*, 47(1), 1-8.
- Bhati, J., Chaduvula, P. K., Kumar, S., & Rai, A. (2013). Phylogenetic analysis and secondary structure prediction for drought tolerant Cap binding proteins of plant species. *Indian journal of agricultural sciences*, 83(1), 21-5.
- Cartea, M. E., & Velasco, P. (2008). Glucosinolates in Brassica foods: bioavailability in food and significance for human health. *Phytochemistry reviews*, 7(2), 213-229.
- 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.
- Ciura, J., & Kruk, J. (2018). Phytohormones as targets for improving plant productivity and stress tolerance. *Journal of Plant Physiology*, 229, 32-40.
- Damirchi, S. A., Savage, G. P., & Dutta, P. C. (2005). Sterol fractions in hazelnut and virgin olive oils and 4, 4'-dimethylsterols as possible markers for detection of adulteration of virgin olive oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 82(10), 717-725.
- Enjalbert, J. N., Zheng, S., Johnson, J. J., Mullen, J. L., Byrne, P. F., & McKay, J. K. (2013). Brassicaceae germplasm diversity for agronomic and seed quality traits under drought stress. *Industrial Crops and Products*, 47, 176-185.
- Estaji, A., & Niknam, F. (2020). Foliar salicylic acid spraying effect on growth, seed oil content, and physiology of drought-stressed *Silybum marianum* L. plant. *Agricultural Water Management*, 234, 106116.
- Eyni-Nargeseh, H., AghaAlikhani, M., Shirani Rad, A.H., Mokhtassi-Bidgoli, A. & Modarres Sanavy, S.A.M. (2020). Late season deficit irrigation for water-saving: selection of rapeseed (*Brassica napus*) genotypes based on quantitative and qualitative features. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 66(1), 126-137.
- Farahani, S., Majidi Heravan, E., Shirani Rad, A. H., & Noormohammadi, G. (2019). Effect of potassium sulfate on quantitative and qualitative characteristics of canola cultivars upon late-season drought stress conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 42(13), 1543-1555.

- 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.
- Guo, R., Qian, H., Shen, W., Liu, L., Zhang, M., Cai, C. & Wang, Q. (2013). BZR1 and BES1 participate in regulation of glucosinolate biosynthesis by brassinosteroids in *Arabidopsis*. *Journal of experimental botany*, 64(8), 2401-2412.
- 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.
- Hatzig, S. V., Nuppenau, J. N., Snowdon, R. J., & Schießl, S. V. (2018). Drought stress has transgenerational effects on seeds and seedlings in winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). *BMC plant biology*, 18(1), 1-13.
- Hosseinpour, M., Ebadi, A., Habibi, H., Nabizadeh, E., & Jahanbakhsh, S. (2020). Enhancing enzymatic and nonenzymatic response of *Echinacea purpurea* by exogenous 24-epibrassinolide under drought stress. *Industrial Crops and Products*, 146, 112045.
- Jabbari, H., Khosh Kholgh Sima, N. A., & Shirani Rad, A. H. (2017). Changes in the oil fatty acids composition of rapeseed cultivars under drought stress conditions. *Applied Field Crops Research*, 30(3), 66-81.
- Javid, M. G., Hoseinifard, M. S., Allahdadi, I., & Soltani, E. (2022). Hormonal priming with BAP and GA₃ induces improving yield and quality of saffron flower through promotion of carbohydrate accumulation in corm. *Journal of Plant Growth Regulation*, 1-11.
- Khan, M. A., Ashraf, M. Y., Mujtaba, S. M., Shirazi, M. U., Khan, M. A., Shereen, A., Mumtaz, S., Agil Siddiqui, M. A., & Kaleri, G. M. (2010). Evaluation of high yielding canola type *Brassica* genotypes/mutants for drought tolerance using physiological indices as screening tool. *Pakistan Journal of Botany*, 42(6), 3807-3816.
- 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*, 23(4), 776-761. <https://dx.doi.org/10.22059/jci.2021.306872.2424>. (In Persian).
- Khayat Moghadam, M. S., Gholami, A., Shirani rad, A. H., BaradaranFiroozabadi, M., & Abbasdokht, H. (2021). The effect of Potassium Silicate and Late-Season Drought Stress on the Physiological Characters of Canola. *Journal of Crops Improvement*, 23(4), 776-761. <https://dx.doi.org/10.22077/ESCS.2020.2723.1787>. (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. (2020). Effect of drought stress on certain morphological and physiological characteristics of a resistant and a sensitive canola cultivar. *Chemistry & Biodiversity*, 17(2), e1900399.
- 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 ZnSO₄ and MnSO₄ on the yield and some oil characteristics of rapeseed cultivars. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21(3), 1904-1916.
- Konuskan, D. B., Arslan, M., & Oksuz, A. (2019). Physicochemical properties of cold pressed sunflower, peanut, rapeseed, mustard and olive oils grown in the Eastern Mediterranean region. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 26(2), 340-344.
- 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.

- Makkar, H. P., Siddhuraju, P., & Becker, K. (2007). *Plant secondary metabolites*. Totowa, NJ, USA: Humana Press.
- Pokotylo, I.V., Kretynin, S.V., Khripach, V.A., Ruelland, E., Blume, Y.B., & Kravets, V.S. (2014). Influence of 24-epibrassinolide on lipid signalling and metabolism in *Brassica napus*. *Plant Growth Regulation*, 73, 9–17. <https://doi.org/10.1007/s10725-013-9863-y>.
- Rathnakumar, A.L., & Sujatha, M. (2022). Breeding Major Oilseed Crops: Prospects and Future Research Needs. In *Accelerated Plant Breeding*. Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-81107-5_1.
- Sadura, I., & Janeczko, A. (2022). Brassinosteroids and the Tolerance of Cereals to Low and High Temperature Stress: Photosynthesis and the Physicochemical Properties of Cell Membranes. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(1), 342.
- Shahzad, B., Tanveer, M., Che, Z., Rehman, A., Cheema, S. A., Sharma, A., Song, H., Rehman, S. U., & Zhaorong, D. (2018). Role of 24-epibrassinolide (EBL) in mediating heavy metal and pesticide induced oxidative stress in plants: A review. *Ecotoxicology and environmental safety*, 147, 935–944. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.09.066>
- Shawon, R. A., Kang, B. S., Lee, S. G., Kim, S. K., Lee, H. J., Katrich, E. & Ku, Y. G. (2020). Influence of drought stress on bioactive compounds, antioxidant enzymes and glucosinolate contents of Chinese cabbage (*Brassica rapa* L.). *Food chemistry*, 308, 125657.
- 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.
- Singh, A., Dwivedi, P., Kumar, V., & Pandey, D. K. (2021). Brassinosteroids and their analogs: Feedback in plants under in vitro condition. *South African Journal of Botany*, 143, 256-265.
- Talaat, N. B., & Shawky, B. T. (2013). 24-Epibrassinolide alleviates salt-induced inhibition of productivity by increasing nutrients and compatible solutes accumulation and enhancing antioxidant system in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Acta Physiologiae Plantarum*, 35(3), 729-740.
- 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.
- Tohidi Moghaddam, H. R. T, Zahedi, H., & Ghooshchi, F. (2011). Oil quality of canola cultivars in response to water stress and super absorbent polymer application. *Pesquisa Agropecuaria Tropical*. 41, 579–586, <https://doi.org/10.5216/pat.v41i4.13366>.
- 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.

- 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.
- Zhao, G., Xu, H., Zhang, P., Su, X., & Zhao, H. (2017). Effects of 2, 4-epibrassinolide on photosynthesis and Rubisco activase gene expression in *Triticum aestivum* L. seedlings under a combination of drought and heat stress. *Plant Growth Regulation*, 81(3), 377-384.