مقاله پژوهشی، صفحات ۱۱۴-۹۸

تعدیل اثرات تنش خشکی در گیاهچه‌های چاودار (*Secale cereale* L.) با محلول‌پاشی هورمون ۲۴-اپی‌براسینولید

سپیده حاتمی[۱]، سید یحیی صالحی لیسار[۱*]، فاطمه رحمانی[۲]، لطیفه پوراکبر[۲] و بتول صمدانی[۳]

[۱] ایران، تبریز، دانشگاه تبریز، دانشکده علوم طبیعی، گروه زیست شناسی گیاهی، سلولی و ملکولی

[۲] ایران، ارومیه، دانشگاه ارومیه، دانشکده علوم، گروه زیست شناسی

[۳] ایران، تهران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، موسسه تحقیقات گیاهپزشکی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۴ تاریخ پذیرش:۱۴۰۲/۰۲/۲۳

چکیده

تنش خشکی یکی از مهم‌ترین تنش‌های محیطی است که رشد و عملکرد گیاهان را در سرتاسر جهان تحت تأثیر قرار می‌دهد. استفاده از تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی مانند براسینواستروئیدها می‌تواند در بهبود مقاومت گیاهان به تنش‌های محیطی مؤثر باشد. به منظور بررسی تأثیر هورمون ۲۴-اپی‌براسینولید بر ویژگی‌های مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی سه توده گیاه چاودار در شرایط تنش خشکی، آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در دانشکده علوم دانشگاه ارومیه در سال ۱۳۹۸ انجام شد. تیمارهای مورد بررسی شامل توده گیاه چاودار در سه سطح (رقم لنکورد اصلاح شده در موسسه تحقیقات اصلاح تهیه نهال و بذر، توده بذر استفاده شده توسط زارعین و توده جمع‌آوری شده از مزارع به عنوان علف هرز)، هورمون ۲۴-اپی‌براسینولید در دو سطح (عدم کاربرد به عنوان شاهد و کاربرد 10^{-8} مولار) و تنش خشکی در چهار سطح (عدم اعمال تنش خشکی به عنوان شاهد و اعمال تنش ۶٪، ۱۲٪ و ۱۸٪ با استفاده از پلی‌اتیلن گلیکول (PEG6000) بودند. نتایج نشان داد سطوح مختلف تنش خشکی سبب کاهش وزن خشک ریشه و اندام‌های هوایی، طول ریشه و اندام‌های هوایی، شاخص بنیه بذر، درصد جوانه‌زنی و محتوای فلاونوئیدهای ریشه و اندام‌های هوایی گردید، در صورتی که محتوای فنل، گلایسین بتائین و آنتوسیانین‌ها را در ریشه و اندام‌های هوایی افزایش داد. از طرفی محلول‌پاشی هورمون ۲۴-اپی‌براسینولید موجب بهبود تمام صفات مورد مطالعه به استثنای غلظت فنل کل ریشه و اندام‌های هوایی گردید. نتایج این پژوهش تأثیر مطلوب هورمون ۲۴-اپی‌براسینولید را بر بهبود فعالیت آنتی‌اکسیدانی غیرآنزیمی از قبیل تجمع گلایسین بتائین، فنل و آنتوسیانین در شرایط تنش خشکی نشان داد. بر اساس این نتایج به نظر می‌رسد محلول‌پاشی هورمون ۲۴-اپی‌براسینولید می‌تواند به‌منظور افزایش درصد جوانه‌زنی، استقرار و تحمل گیاهچه چاودار به تنش خشکی در مزارع توصیه شود.

واژه های کلیدی: : آنتی‌اکسیدان‌های غیرآنزیمی، پلی‌اتیلن گلیکول، ترکیبات فنلی، تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی، گلایسین بتائین

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: y_salehi@tabrizu.ac.ir

مقدمه

چاودار با نام علمی (*Secale Montanum*) گیاهی از خانواده گندمیان (*Gramineae* یا *Poaceae*) و جنس *Secale* است. چاودار زراعی (*Secale cereale* L.) مهم‌ترین گونه چاودار می‌باشد که در نقاط مختلف جهان کشت می‌شود (۳). دامنه وسیع سازگاری چاودار به شرایط نامساعد محیطی، ظرفیت مناسب برای زمستان گذرانی، نیاز غذای کم و عملکرد زیاد در همه شرایط حتی در اراضی شنی و سنگلاخی، باعث شده است تا این گیاه را در مناطقی که برای غلات دیگر مناسب نیست کشت کرد (۳۲ و ۴۱). فرآورده‌های به‌دست آمده از چاودار با دارا بودن سطح

زیادی از فیبر یکی از بهترین و سالم‌ترین رژیم‌های غذایی به شمار می‌روند. چاودار حاوی مقادیر زیادی از ترکیبات غذایی مفید مانند مواد معدنی از قبیل روی، آهن، فسفر، بتاگلوکان‌ها، نشاسته و ترکیبات فعال کننده زیستی است (۳۳). هم‌چنین این گیاه منبع خوبی از اسیدآمینه لایزین، تیامین، اسید نیکوتین، ریبوفلاوین، پیریدوکسین، اسید فانتوتنیک و توکوفرول است (۴۲ و ۹۹). دانه چاودار عموماً برای تولید اشکال مختلف نان و از علوفه آن نیز در تغذیه دام استفاده می‌شود (۳۴ و ۴۱). از اثرات چاودار بر سلامتی انسان می‌توان به بهبود عملکرد روده (۴۹)، کنترل وزن به دلیل افزایش ویسکوزیته غذا در معده (۵۶)، کاهش کلسترول به دلیل کاهش جذب اسیدهای صفراوی (۶۶) و محافظت در مقابل سرطان (۹۸) اشاره کرد.

تنش خشکی از مهم‌ترین تنش‌های غیرزیستی محدودکننده رشد و تولید محصولات کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک به شمار می‌آید، به طوری که در اثر تنش خشکی، میانگین تولید محصولات زراعی می‌تواند بیش از ۵۰ درصد کاهش یابد (۹۳). تنش آبی اثرات زیان‌باری بر رشد و نمو و استقرار گیاه دارد و از طریق تأثیر بر فرآیندهای مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی مختلف از قبیل فتوسنتز، تنفس، انتقال، جذب یون، کربوهیدرات‌ها، کاهش تقسیم و گسترش سلولی، اندازه برگ، طویل شدن ساقه و تکثیر ریشه و مختل شدن نوسانات روزنه‌ای، کاهش کارایی مصرف آب، رشد و نمو گیاهان را کاهش می‌دهد (۵۸ و ۶۷). از طرفی تنش خشکی موجب تولید گونه‌های فعال اکسیژن می‌شود که سبب آسیب به رنگیزه‌های فتوسنتزی، کربوهیدرات‌ها، پروتئین‌ها، لیپیدها و نوکلئیک اسیدها می‌گردد (۷۴). گیاهان برای مقابله با گونه‌های فعال اکسیژن تعدادی از مکانیسم‌های دفاع آنتی‌اکسیدانی آنزیمی و غیرآنزیمی را دارا هستند. ترکیبات آنتی‌اکسیدانی غیرآنزیمی شامل ترکیبات با وزن مولکولی کم از قبیل فلاونوئیدها، فنل‌ها، پلی‌فنل‌ها، آسکوربیک اسید، کومارین-ها، کارتنوئیدها، آنتوسیانین‌ها، تانن‌ها، توکوفرول‌ها می-باشند که سبب مقاومت گیاهان در مقابل گونه‌های فعال اکسیژن می‌شوند (۶۵). خزاعی و همکاران (۱۳۸۹) گزارش کردند که وزن خشک اندام‌های هوایی و ریشه ژنوتیپ‌های تریتیکاله تحت تأثیر محدودیت آبی کاهش یافت (۹). طالع‌احمد و حداد (۲۰۱۱) و کراسکول و همکاران (۲۰۰۹) بیان داشتند که محتوای گلایسین بتائین در گیاهان گندم و سیب‌زمینی تحت تنش خشکی بیش‌تر از گیاهان شاهد بود (۸۹ و ۴۴). گزارش شده است که مقدار آنتوسیانین‌ها در گیاه *Begonia semperflorens* در شرایط تنش نوری بالا افزایش می‌یابد (۹۶). یوسفی و همکاران (۱۳۹۶) اظهار داشتند که محتوای فنل کل و گلایسین بتائین گیاه ذرت در شرایط تنش خشکی افزایش نشان داد (۲۳).

یکی از راه‌های مقابله و تطابق گیاهان با تنش‌های محیطی، استفاده از تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی می‌باشد (۳۶). تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی به هورمون‌های طبیعی و مصنوعی اطلاق می‌گرد که استفاده از آن‌ها در کشاورزی برای بهبود رشد و نمو گیاه، تولید و کیفیت محصول و افزایش تحمل به تنش‌ها به‌طور قابل توجهی رایج شده است (۵۴). ترکیباتی از قبیل براسینواستروئیدها، جاسمونات‌ها و سالیسیلیک اسید جزء تنظیم کننده‌های رشد گیاهی طبقه‌بندی می‌شوند (۷۷). براسیتواستروئیدها در غلظت‌های بسیار کم در اکثر مراحل رشدی گیاهان از جمله تقسیم و طویل شدن سلولی ساقه و ریشه، پیری برگ، اندام‌زایی، تمایز آوندی، نرباروری، تنظیم زمان پیری و توسعه برگی (۵۲ و ۵۳) و نیز رشد لوله‌ی دانه‌ی گرده، تشکیل ریشه، القاء بیوسنتز اتیلن، فعال کردن پمپ پروتون و تنظیم بیان ژن نقش دارند (۶۱). هم‌چنین توانایی آن‌ها در افزایش تحمل گیاه در مقابل تنش‌های محیطی در مطالعات آزمایشگاهی، گلخانه‌ای و شرایط مزرعه به اثبات رسیده است (۶۴). گیل و همکاران (۲۰۱۷) اظهار داشتند که کاربرد هورمون براسینولید در شرایط تنش خشکی سبب بهبود طول و وزن خشک ریشه و اندام‌های هوایی گیاه جو

شد (۴۷). جهانی دوقزلو و امام (۱۳۹۶) بیان داشتند که پیش تیمار بذر ارقام گندم توسط براسینواستروئید باعث افزایش درصد و سرعت جوانه‌زنی می‌شود (۶). گزارش گردیده است که میزان فنل کل و فلاونوئیدها در گیاهان توت‌فرنگی (۳۸) و گشنیز (۴۵) از طریق محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و متیل جاسمونات افزایش یافت. پارالوباتو و همکاران (۲۰۰۹) نشان دادند که میزان آنتوسیانین‌ها و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی با تیمارهای اسید جاسمونیک، جیبرلیک و سالیسیلیک اسید در گیاه آفتابگردان افزایش یافت (۷۶).

کشور ایران از لحاظ آب و هوایی جزء مناطق خشک و نیمه‌خشک به شمار می‌آید و از این‌رو تنش کمبود آب حاکم بر اقلیم ایران، موجب کاهش رشد و عملکرد محصولات کشاورزی می‌شود. بنابراین ارائه هرگونه راه‌کار اجرایی برای تعدیل اثرات تنش خشکی و کاهش آسیب-های وارده از طریق آن امری ضروری می‌باشد. در این راستا و با توجه به تأثیر هورمون‌های گیاهی در تنظیم رشد و نمو گیاهان و ایجاد مقاومت در برابر تنش‌های محیطی موجب گردید تا اثرات ناشی از هورمون ۲۴-اپی‌براسینولید بر برخی خصوصیات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی چاودار تحت شرایط تنش خشکی مورد بررسی قرار گیرد.

مواد و روشها

این آزمایش در سال ۱۳۹۸ در آزمایشگاه‌های فیزیولوژی و ژنتیک دانشکده علوم دانشگاه ارومیه اجرا شد. آزمایش به-صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار انجام شد. تیمارهای مورد بررسی شامل توده گیاه چاودار در سه سطح (رقم لنکورد اصلاح شده در موسسه تحقیقات اصلاح تهیه نهال و بذر، توده بذر استفاده شده توسط زارعین و توده جمع‌آوری شده از مزارع به عنوان علف هرز)، هورمون ۲۴-اپی‌براسینولید تهیه شده از شرکت Sigma-Aldrich در دو سطح (عدم کاربرد به عنوان شاهد و کاربرد 10^{-8} مولار) و تنش خشکی در چهار سطح (عدم اعمال تنش خشکی به عنوان شاهد و اعمال تنش ۶٪، ۱۲٪ و ۱۸٪ با استفاده از پلی‌اتیلن گلیکول (PEG6000) بودند. بر اساس مطالعات صورت گرفته، غلظت 10^{-8} مولار به عنوان یک غلظت موثر و تأثیرگذار در بسیاری از گیاهان گزارش شده است (۸۵). غلظت 10^{-8} مولار این هورمون با رقیق-سازی محلول استوک در آب مقطر تهیه شد. برای تهیه ۱۰۰ میلی‌لیتر هورمون 10^{-8} مولار، ۱ میکرولیتر از هورمون در ۹۹/۹۹۹ میلی‌لیتر آب مقطر حل گردید. قبل از کشت، بذرهای گیاه چاودار با استفاده از اتانول ۷۰٪ به مدت ۲ دقیقه و سدیم هیپوکلریت ۵٪ به مدت ۵ دقیقه استریل شدند و در نهایت با آب مقطر برای چندین بار شستشو داده شدند. پس از گذشت ۲۴ ساعت نگهداری در آب مقطر استریل، به منظور اعمال تیمار هورمون، بذور استریل شده در آب مقطر (گروه شاهد) یا محلول ۲۴-اپی-براسینولید (10^{-8} مولار) در دمای اتاق به مدت ۲۴ ساعت در تاریکی قرار داده شدند (۲۵). سپس در هر گروه تیمار، بذور بر روی دو ورقه کاغذ صافی (کنترل و تیمار ۲۴-اپی‌براسینولید) مرطوب شده با آب مقطر و یا غلظت‌های متفاوت پلی‌اتیلن گلیکول (۰، ۶٪، ۱۲٪ و ۱۸٪) انتقال داده شدند و برای جوانه‌زنی به مدت سه روز در دمای ۲±۲۷ درجه سانتی‌گراد و در شرایط تاریکی درون ژرمیناتور قرارگرفتند (۷۱). پس از گذشت سه روز، بذرهای جوانه-زده به بطری‌های شیشه‌ای انتقال داده شدند. برای هر تیمار ۳ بطری در نظر گرفته شد و در هر بطری ۲۰ بذر جوانه‌زده قرار گرفت. بطری‌ها به مدت ۷ روز به اتاقک کشت با شدت نور $350 \mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$، دمای ۲±۲۷ درجه‌سانتی‌گراد و رطوبت ۷۰٪ منتقل شدند. بعد از ۷ روز دانه‌رست‌های ۱۰ روزه برداشت شده و تا زمان انجام آزمایش در فریزر ۸۰- درجه‌سانتی‌گراد نگهداری شدند. کارهای آزمایشگاهی مورد نیاز در آزمایشگاه‌های فیزیولوژی و ژنتیک دانشکده علوم دانشگاه ارومیه انجام گردید.

برای استخراج عصاره پلی‌فنلی جهت سنجش محتوای فنل کل و فلاونوئیدها، ۰/۲ گرم از بافت گیاهی در نیتروژن

مایع ساییده و با ۱/۵ میلی‌لیتر اتانول ۷۰ درصد (pH= ۳/۲) حل گردید و در شرایط تاریکی نگه‌داری شد. سپس نمونه‌ها با سرعت ۱۳۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد سانتریفوژ شدند. محلول رویی با دقت از رسوب جدا شد و برای سنجش محتوای فنل کل و فلاونوئیدها مورد استفاده قرار گرفت (۹۲). برای سنجش محتوای فنل کل ۱۲۵ میکرولیتر عصاره ، ۱/۵ میلی‌لیتر آب مقطر و ۱۲۵ میکرولیتر معرف فولین سیاکولتا (Folin-Ciocalteu) مخلوط شدند و بعد از گذشت ۶ دقیقه، ۱/۲۵ میلی‌لیتر محلول سدیم کربنات ۷٪ به مخلوط حاصل اضافه گردید و در نهایت نمونه‌ها به مدت ۹۰ دقیقه در تاریکی نگه‌داری شدند و نهایتا جذب آن‌ها در طول موج ۷۶۰ نانومتر با استفاده از اسپکتروفتومتر خوانده شد. محتوای فنل کل در هر نمونه با کمک معادله حاصل از منحنی استاندارد گالیک اسید محاسبه گردید (۹۲). برای سنجش فلاونوئیدها، ۰/۵ میلی‌لیتر عصاره با ۵۰ میکرولیتر اسید استیک ۳۳٪ و ۱۰۰ میکرولیتر محلول تازه تهیه شده آلومینیوم کلراید ۱۰٪ مخلوط شد و حجم نهایی با استفاده از اتانول ۹۶٪ به ۲/۵ میلی‌لیتر رسید. بعد از ۳۰ دقیقه جذب آن‌ها در طول موج ۴۱۴ نانومتر و با دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت شد. محتوای فلاونوئیدها در هر نمونه با کمک معادله حاصل از منحنی استاندارد کوئرستین محاسبه گردید (۷۸).

برای سنجش محتوای آنتوسیانین‌ها، ۰/۱ گرم از بافت تازه گیاهی ساییده شده در نیتروژن مایع با ۱ میلی‌لیتر محلول اسید کلریدریک ۱٪ متانول در یک هاون چینی مخلوط شد. همگنای حاصل به مدت ۲۴ ساعت در ۲۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد. سپس محلول به مدت ۱۰ دقیقه و در ۱۳۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفوژ گردید. سپس فاز رویی محلول برداشته شد و جذب آن‌ها در طول موج‌های ۵۳۰ و ۶۵۷ نانومتر قرائت شد. محتوای آنتوسیانین‌ها با استفاده از رابطه ۱ محاسبه گردید (۲۴)

Anthocyanin= [A530-(1.4*A657)] رابطه ۱:

محتوای گلایسین بتائین به روش گریو و گراتان (۱۹۸۳) اندازه‌گیری شد (۵۱). بـه ۰/۲ گرم از برگ خشک شده، ۲۰ میلی‌لیتر آب مقطر اضافه گردید و به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد بر روی شیکر قرار داده شد. سپس یک میلی‌لیتر از عصاره گیاهی با یک میلی‌لیتر اسید سولفوریک ۲ نرمال مخلوط شد و در حمام آب یخ قرار گرفت. سپس ۰/۲ میلی‌لیتر معرف یدور پتاسیم سرد به نمونه‌ها اضافه شد و نمونه‌ها به مدت ۱۶ ساعت در دمای صفر تا ۴ درجهٔ سانتی‌گراد نگهداری شدند. مخلوط حاصل با سرعت ۱۰۰۰۰ دور بر دقیقه در دمای ۴ درجهٔ سانتی-گراد به مدت ۱۵ دقیقه سانتریفوژ شد. سپس محلول روشناور جدا شد و کریستال‌های ته‌نشین شدهٔ پریدید با آب مقطر شسته شدند تا معرف رنگی موجود روی آن‌ها شسته شود. سپس کریستال‌های پریدید در ۱ میلی‌لیتر حلال ۱ و ۲ دی کلرواتان ورتکس شدند تا درون حلال حل شدند و رنگ قرمز ظاهر شد. محلول رنگی حاصل به مدت ۲ ساعت نگهداری و سپس جذب نمونه‌ها در طول موج ۳۶۵ نانومتر با اسپکتروفتومتر خوانده شد. محتوای گلایسین بتائین با نمودار استاندارد مربوط به گلایسین بتائین خالص، محاسبه شد.

برای اندازه‌گیری درصد جوانه‌زنی و شاخص بنیه بذر، تعداد ۵۰ بذر از هر تیمار، داخل هر ظرف پتری‌دیش و روی کاغذ صافی واتمن قرار داده شد و پس از اضافه کردن آب کافی درب آن‌ها بسته شد و در داخل دستگاه ژرمیناتور با درجه حرارت ۲۵ درجه سانتی‌گراد و دوره نوری ۱۶ ساعت روشنایی و ۸ ساعت تاریکی قرار داده شدند. برای اندازه‌گیری درصد جوانه‌زنی شمارش بذرهای جوانه‌زده از روز دوم با مشاهده ریشه‌چه (حداقل طول ریشه‌چه ۲ تا ۳ میلی‌متر) آغاز شد و این شمارش تا پایان زمانی که سه روز متوالی هیچ افزایشی در بذرهای جوانه-زده مشاهده نشد ادامه داشت. پس از آن تعداد کل بذرهای

جوانه‌زده شمارش و درصد جوانه‌زنی و شاخص بنیه بذر از رابطه‌های ۲ و ۳ محاسبه گردید.

رابطه ۲: $GP= (n/N)\times100$

در این رابطه GP برابر با درصد جوانه‌زنی، n برابر با تعداد کل بذرهای جوانه‌زده در روز آخر و N برابر با تعداد کل بذرهای کشت شده می‌باشند.

رابطه ۳: ۱۰۰× (میانگین طول گیاهچه × درصد جوانه-زنی)= شاخص بنیه بذر

برای اندازه‌گیری طول ریشه و اندام‌های هوایی و وزن خشک آن‌ها تعداد ۲۰ دانه‌رست ۱۰ روزه از هر تیمار به صورت تصادفی برداشت شد و طول ریشه و ساقه با خط-کش اندازه‌گیری و یادداشت گردید. سپس نمونه‌ها برای خشک شدن در آون به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و وزن خشک آن‌ها با ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۱گرم توزین شد.

برای تجزیه داده‌ها و رسم نمودارها از نرم افزارهای SAS9.1 و Excel استفاده شد و مقایسه میانگین‌ها با آزمون Duncan در سطح احتمال ۵ درصد صورت گرفت.

نتایج

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تنش خشکی و هورمون بر تمام صفات مورد مطالعه تأثیر معنی‌دار داشت. همچنین بین ژنوتیپ‌های مختلف در صفات فنل کل ریشه، درصد جوانه‌زنی و شاخص بنیه بذر اختلاف معنی‌دار مشاهده شد. تمام صفات مورد بررسی به استثنای محتوای گلایسین بتائین ریشه و اندام‌های هوایی، فنل کل و فلاونوئیدهای اندام‌های هوایی و وزن خشک ریشه، تحت تأثیر اثر متقابل خشکی و ژنوتیپ اختلاف معنی‌داری را نشان دادند. اثر متقابل تنش خشکی در هورمون نیز بر صفات محتوای گلایسین بتائین ریشه و اندام‌های هوایی، آنتوسیانین‌های ریشه و اندام‌های هوایی، فنل کل ریشه و اندام‌های هوایی، درصد جوانه زنی و شاخص بنیه بذر معنی‌دار گردید. اثر دوگانه ژنوتیپ × هورمون تنها بر محتوای آنتوسیانین‌های اندام‌های هوایی معنی‌دار بود. نتایج همچنین نشان داد که اثر سه‌گانه تیمارهای مورد مطالعه بر محتوای آنتوسیانین‌ها در ریشه و اندام‌های هوایی و درصد جوانه زنی بذر معنی‌دار بود (جدول ۱).

وزن خشک ریشه و اندام‌های هوایی

نتایج نشان داد که اعمال تنش خشکی سبب کاهش وزن خشک ریشه و اندام‌های هوایی توده‌های گیاه چاودار گردید. بیش‌ترین وزن خشک ریشه و اندام‌های هوایی (به ترتیب ۰/۰۶۱ و ۰/۱۹۵ گرم) در شرایط بدون تنش خشکی مشاهده گردید (جدول ۲). کم‌ترین وزن خشک ریشه (۰/۰۳۱ گرم) و اندام‌های هوایی (۰/۰۹۶ گرم) تحت شرایط تنش خشکی ۱۸٪ به دست آمد (جدول ۲). اعمال تنش‌های ۶، ۱۲ و ۱۸٪ از پلی‌اتیلن گلیکول به ترتیب باعث کاهش ۱۴/۷۵، ۲۹/۵ و ۴۹/۱۸ درصد وزن خشک ریشه و ۱۱/۷۹، ۳۶/۹۲ و ۵۰/۷۶ درصد وزن خشک اندام-های هوایی در مقایسه با شاهد (بدون تنش) گردید (جدول ۲). هم‌چنین بین توده‌های گیاه چاودار از لحاظ وزن خشک ریشه و اندام‌های هوایی تفاوت معنی‌داری وجود نداشت (جدول ۲). وزن خشک ریشه و اندام‌های هوایی تحت تأثیر محلول‌پاشی هورمون ۲۴-اپی‌براسینولید بهبود یافت، به‌طوری که حداکثر وزن خشک ریشه (۰/۰۶۱ گرم) و اندام‌های هوایی (۰/۱۵۸ گرم) در حالت محلول‌پاشی با هورمون ۲۴-اپی‌براسینولید و حداقل میزان این شاخص‌ها به ترتیب با ۰/۰۳۳ و ۰/۱۳۵ گرم در حالت عدم استفاده از این هورمون به دست آمد (جدول ۲). کاربرد هورمون ۲۴-اپی‌براسینولید در مقایسه با عدم کاربرد آن سبب افزایش ۸۴/۸۴ درصدی وزن خشک ریشه و ۱۷/۰۳ درصدی وزن خشک اندام‌های هوایی نسبت به گیاهان شاهد گردید (جدول ۲).

جدول ۱- تجزیه واریانس تأثیر تنش خشکی، توده بذری و هورمون بر صفات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی

منابع تغییرات	درجه آزادی	گلایسین بتائین ریشه	گلایسین بتائین اندام‌های هوایی	آنتوسیانین ریشه	آنتوسیانین اندام‌های هوایی	قند ریشه	قند کل اندام‌های هوایی	فلاونوئید ریشه	فلاونوئید اندام‌های هوایی
تنش خشکی	۳	۴۲۷۱/۵۵ **	۱۰۸۷۹/۵ **	۰/۴۷ **	۱/۰۶ **	۲/۹۰۵ **	۱۰۰/۵۳ **	۰/۱۵۳ **	۲/۳۰۹ **
توده بذر	۲	۴/۱۳ ns	۲۰/۷۱ ns	۰/۰۰۰۶ ns	۰/۰۳ ns	۰/۰۱۳ *	۱/۰۲۳ ns	۰/۰۰۰۲ ns	۰/۰۱ ns
هورمون	۱	۲۹۰ **	۷۳۹/۲ **	۰/۴۴ **	۰/۱۳ *	۱/۴۴۲ **	۱۲۰/۱۲ **	۰/۰۱۹ **	۰/۰۷۶ **
تنش خشکی × توده بذر	۶	۷/۳۱ ns	۱۵/۶۸ ns	۰/۰۰۰۷ *	۰/۱۹ **	۰/۰۱۸ **	۰/۹۲ ns	۰/۰۰۲ **	۰/۰۰۵ ns
تنش خشکی × هورمون	۳	۲۴/۱۱ **	۷۶/۵۳ **	۰/۰۱ **	۰/۳۷ **	۰/۰۱۹ **	۵/۱۱ **	۰/۰۰۰۲ ns	۰/۰۱۲ ns
توده بذر × هورمون	۲	۵/۸ ns	۸/۱۱ ns	۰/۰۰۰۸ ns	۰/۲۶ **	۰/۰۰۵ ns	۰/۱۶ ns	۰/۰۰۰۳ ns	۰/۰۰۰۷ ns
تنش خشکی × توده بذر × هورمون	۶	۳/۳ ns	۱۳/۵۴ ns	۰/۰۰۱ **	۰/۱۱ **	۰/۰۰۶ ns	۰/۴۱ ns	۰/۰۰۰۲ ns	۰/۰۰۰۹ ns
اشتباه آزمایشی (خطا)	۴۸	۵/۵۳	۱۰/۵	۰/۰۰۰۲	۰/۰۲	۰/۰۰۳	۰/۶۲	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۶
ضریب تغییرات (٪)	-	۵/۲۷	۳/۲۶	۴/۰۹	۱۸/۶۵	۴/۷۵	۷/۷۸	۴/۶۶	۶/۵

ادامه جدول ۱:

منابع تغییرات	درجه آزادی	وزن خشک ریشه	وزن خشک اندام‌های هوایی	طول ریشه	طول اندام‌های هوایی	درصد جوانه‌زنی	شاخص بنیه بذر
تنش خشکی	۳	۰/۰۰۲ **	۰/۰۳۶ **	۴۴/۳۰۲ **	۶۳/۳۸ **	۱۶۳۸۵/۳۹ **	۲۵۲/۲۳ **
توده بذر	۲	۰/۰۰۰۰۶ ns	۰/۰۰۰۰۹ ns	۰/۸۴۸ ns	۱/۰۴ ns	۸۳/۸۴ **	۳/۷۳ **
هورمون	۱	۰/۰۱۳ **	۰/۰۰۹ **	۹/۴۶ **	۱۰/۹۴ **	۱۶۹/۲۸ **	۲۵/۲۱ **
تنش خشکی × توده بذر	۶	۰/۰۰۰۰۴ ns	۰/۰۰۰۱ *	۱/۸۵ **	۴/۵۲ **	۳۴/۶۶ **	۳/۹۷ **
تنش خشکی × هورمون	۳	۰/۰۰۰۱ ns	۰/۰۰۰۰۵ ns	۰/۷۹ ns	۰/۵۴ ns	۲۳/۱۳ **	۴/۱۵ **
توده بذر × هورمون	۲	۰/۰۰۰۰۳ ns	۰/۰۰۰۰۰۲ ns	۰/۰۸۲ ns	۰/۰۷ ns	۳/۷۱ ns	۰/۲۱ ns
تنش خشکی × توده بذر × هورمون	۶	۰/۰۰۰۰۱ ns	۰/۰۰۰۰۶ ns	۰/۰۵۳ ns	۰/۱۱ ns	۴/۸۴ *	۰/۱۵ ns
اشتباه آزمایشی (خطا)	۴۸	۰/۰۰۰۰۵	۰/۰۰۰۰۴	۰/۴۳۹	۰/۶۷	۱/۶۴	۰/۵۰۶
ضریب تغییرات (٪)	-	۱۵/۰۱	۴/۷۱	۱۹/۴۲	۱۴/۷۳	۲/۸	۱۲/۵

"، " و "" به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

مقایسه میانگین‌ها برای اثر متقابل دوگانه خشکی و توده بذر بیانگر آن بود که توده بذری جمع‌آوری شده از مزارع (۰/۲۰۱ گرم) و لنکورد (۰/۱۹۵ گرم) در شرایط بدون تنش خشکی دارای بالاترین وزن خشک اندام‌های هوایی و هم‌چنین هر سه توده مورد مطالعه تحت شرایط تنش خشکی ۱۸٪، دارای پایین‌ترین میزان وزن خشک اندام‌های هوایی بودند (جدول ۳).

طول ریشه و اندام‌های هوایی: نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که تنش خشکی سبب کاهش طول ریشه و اندام‌های هوایی توده‌های گیاه چاودار گردید (جدول ۲). کم‌ترین طول ریشه و اندام‌های هوایی (به ترتیب ۱/۲۴ و ۲/۸۶ سانتی‌متر) در شرایط تنش خشکی ۱۸٪ و بیش‌ترین طول ریشه (۴/۹ سانتی‌متر) و طول اندام‌های هوایی (۷/۰۸ سانتی‌متر) در شرایط بدون تنش خشکی به دست آمد (جدول ۲). در بین توده‌های بذری مورد بررسی نیز از لحاظ طول ریشه و اندام‌های هوایی اختلاف معنی‌دار مشاهده نگردید (جدول ۲). از طرفی طول ریشه و اندام‌های هوایی با محلول‌پاشی هورمون ۲۴-اپی‌براسینولید در مقایسه با عدم محلول‌پاشی افزایش یافت. بیش‌ترین طول ریشه (۳/۷۷ سانتی‌متر) و اندام‌های هوایی (۵/۹۵ سانتی‌متر) مربوط به تیمار محلول‌پاشی و کم‌ترین آن‌ها (به ترتیب ۳/۰۵ و ۵/۱۷ سانتی‌متر) متعلق به عدم محلول‌پاشی با هورمون ۲۴-اپی‌براسینولید بود (جدول ۲). سطوح تنش خشکی ۶، ۱۲ و ۱۸٪ در مقایسه با شرایط بدون تنش طول ریشه را به ترتیب ۱۶/۷۳، ۳۰/۲ و ۷۴/۶۹ درصد و طول اندام‌های هوایی را به ترتیب ۷/۷۶، ۱۸/۳۶ و ۵۹/۶ درصد کاهش داد، در صورتی که محلول‌پاشی با هورمون ۲۴-اپی‌براسینولید طول ریشه را ۲۳/۶ درصد و طول اندام‌های هوایی را ۱۵/۰۸ درصد افزایش داد (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین‌ها برای اثر متقابل بین توده بذری و تنش خشکی نشان داد که حداکثر طول ریشه (۵/۷۷ سانتی‌متر) و اندام‌های هوایی (۸/۰۴ سانتی‌متر) در توده جمع‌آوری شده از مزارع و در شرایط بدون تنش خشکی مشاهده گردید. کم‌ترین طول ریشه و اندام‌های هوایی (به ترتیب ۰/۶۹ و ۱/۶۶ سانتی‌متر) را رقم لنکورد در شرایط اعمال تنش خشکی ۱۸٪ به خود اختصاص داد (جدول ۳).

فلاونوئیدهای ریشه و اندام‌های هوایی

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که اعمال تنش خشکی سبب کاهش محتوای فلاونوئیدها در ریشه و اندام هوایی گردید (جدول ۲). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که پایین ترین غلظت فلاونوئیدهای ریشه (۰/۱۹۶ میلی‌گرم کوئرسیتین در گرم وزن تر) و اندام‌های هوایی (۰/۷۶۸ میلی‌گرم کوئرسیتین در گرم وزن تر) تحت تنش خشکی ۱۸٪ مشاهده گردید (جدول ۲). از طرفی بیش‌ترین غلظت فلاونوئیدهای ریشه و اندام‌های هوایی (به ترتیب ۰/۴۱۵ و ۱/۶۰۳ میلی‌گرم کوئرسیتین در گرم وزن تر) در شرایط بدون تنش خشکی (شاهد) به دست آمد (جدول ۲). اعمال تنش‌های خشکی ۶، ۱۲ و ۱۸٪ در مقایسه با شرایط بدون تنش غلظت فلاونوئیدها در ریشه را به ترتیب ۱۴/۴۵، ۲۴/۰۹ و ۵۲/۷۷ درصد و در اندام‌های هوایی نیز به ترتیب ۱۱/۶، ۲۱/۷ و ۵۲/۰۸ درصد کاهش داد (جدول ۲). از طرفی محلول‌پاشی هورمون ۲۴-اپی‌براسینولید سبب بهبود غلظت فلاونوئیدها در ریشه و اندام‌های هوایی گردید. در این راستا محتوای فلاونوئیدها در ریشه و اندام‌های هوایی تحت تأثیر محلول‌پاشی هورمون ۲۴-اپی‌براسینولید در مقایسه با عدم مصرف آن به ترتیب ۱۰/۸۹ و ۵/۲۹ درصد افزایش یافت. در بین توده‌های بذری مورد مطالعه نیز تفاوت معنی‌داری از لحاظ غلظت فلاونوئیدها در ریشه و اندام‌های هوایی وجود نداشت (جدول ۲). اثر دوگانه توده بذری در تنش خشکی نشان داد که حداکثر محتوای فلاونوئیدهای ریشه در توده مورد استفاده توسط زارعین و لنکورد و تحت شرایط بدون تنش خشکی (به ترتیب ۰/۴۳۳ و ۰/۴۲۸ میلی‌گرم کوئرسیتین در گرم وزن تر) به دست آمد.

جدول ۲: مقایسه میانگین اثر تنش خشکی، توده بذری و هورمون ۲۴-اپی‌براسینولید بر محتوای فلاونوئیدها، وزن خشک ریشه و اندام‌های هوایی و طول ریشه و اندام‌های هوایی.

		فلاونوئید ریشه (میلی‌گرم کوئرسیتین در گرم وزن تر)	فلاونوئید اندام‌های هوایی (میلی‌گرم کوئرسیتین در گرم وزن تر)	وزن خشک ریشه (گرم)	وزن خشک اندام‌های هوایی (گرم)	طول ریشه (سانتی‌متر)	طول اندام‌های هوایی (سانتی‌متر)
تنش خشکی (پلی‌اتیلن گلیکول)	بدون تنش (شاهد)	۰/۴۱۵ a	۱/۶۰۳ a	۰/۰۶۱ a	۰/۱۹۵ a	۴/۹ a	۷/۰۸ a
	۶٪	۰/۳۵۵ b	۱/۴۱۷ b	۰/۰۵۲ b	۰/۱۷۲ b	۴/۰۸ b	۶/۵۳ a
	۱۲٪	۰/۳۱۵ c	۱/۲۵۵ c	۰/۰۴۳ c	۰/۱۲۳ c	۳/۴۲ c	۵/۷۸ b
	۱۸٪	۰/۱۹۶ d	۰/۷۶۸ d	۰/۰۳۱ d	۰/۰۹۶ d	۱/۲۴ d	۲/۸۶ c
توده بذری	استفاده شده توسط زارعین	۰/۳۲۲ a	۱/۲۴۲ a	۰/۰۴۵ a	۰/۱۴۴ a	۳/۵۲ a	۵/۴۵ a
	جمع‌آوری شده از مزراع	۰/۳۱۶ a	۱/۲۵۷ a	۰/۰۴۸ a	۰/۱۴۷ a	۳/۵۱ a	۵/۸ a
	لنکورد	۰/۳۲۱ a	۱/۲۸۳ a	۰/۰۴۸ a	۰/۱۴۸ a	۳/۱۹ a	۵/۴۴ a
هورمون	عدم مصرف (شاهد)	۰/۳۰۳ b	۱/۲۲۸ b	۰/۰۳۳ b	۰/۱۳۵ b	۳/۰۵ b	۵/۱۷ b
	مصرف ۲۴-اپی‌براسینولید	۰/۳۳۶ a	۱/۲۹۳ a	۰/۰۶۱ a	۰/۱۵۸ a	۳/۷۷ a	۵/۹۵ a

میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون و هر تیمار اختلاف آماری معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد با هم ندارند.

جدول ۳: مقایسه میانگین اثر تنش خشکی بر برخی صفات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی توده‌های گیاه چاودار.

ترکیبات تیماری	فنل ریشه (میلی‌گرم گالیک اسید در گرم وزن تر)	فلاونوئید ریشه (میلی‌گرم کوئرسیتین در گرم وزن تر)	وزن خشک اندام‌های هوایی (گرم)	طول ریشه (سانتی‌متر)	طول اندام‌های هوایی (سانتی‌متر)	شاخص بنیه بذر
عدم تنش خشکی × استفاده شده توسط زارعین	۰/۷۸۶ d	۰/۴۳۳ a	۰/۱۸۸ ab	۴/۳۹ b	۶/۲ bc	۷/۷۵ c
عدم تنش خشکی × جمع‌آوری شده از مزراع	۰/۷۰۳ d	۰/۳۸۳ b	۰/۲۰۱ a	۵/۷۷ a	۸/۰۴ a	۱۰/۵ a
عدم تنش خشکی × لنکورد	۰/۷۱۱ d	۰/۴۲۸ a	۰/۱۹۵ a	۴/۵۵ b	۶/۹۹ ab	۹/۳ b
خشکی ۶٪ × استفاده شده توسط زارعین	۱/۰۴۸ c	۰/۳۶ bc	۰/۱۷۶ bc	۴/۰۶ bc	۶/۱۳ bc	۵/۴۴ de
خشکی ۶٪ × جمع‌آوری شده از مزراع	۰/۹۹۶ c	۰/۳۶ bc	۰/۱۶۸ c	۳/۹۱ bcd	۶/۱۷ bc	۵/۶ d
خشکی ۶٪ × لنکورد	۱/۱۱۱ c	۰/۳۴۵ cd	۰/۱۷۲ bc	۴/۲۷ b	۷/۲۹ a	۶/۹۴ c
خشکی ۱۲٪ × استفاده شده توسط زارعین	۱/۳۱۶ b	۰/۳۱۳ e	۰/۱۱۸ d	۳/۸۹ bcd	۵/۷۴ c	۴/۲۸ ef
خشکی ۱۲٪ × جمع‌آوری شده از مزراع	۱/۳۸۶ b	۰/۳۰۸ e	۰/۱۲۵ d	۳/۰۸ d	۵/۸ c	۴/۰۶ f
خشکی ۱۲٪ × لنکورد	۱/۳۳۳ b	۰/۳۲۳ de	۰/۱۲۷ d	۳/۲۷ cd	۵/۸ c	۴/۳۳ ef
خشکی ۱۸٪ × استفاده شده توسط زارعین	۱/۷۵ a	۰/۱۸۳ g	۰/۰۹۶ e	۱/۷۴ e	۳/۷۲ d	۰/۳۱ g
خشکی ۱۸٪ × جمع‌آوری شده از مزراع	۱/۶۲۶ a	۰/۲۱۵ f	۰/۰۹۳ e	۱/۲۹ ef	۳/۲۱ d	۰/۲۳ g
خشکی ۱۸٪ × لنکورد	۱/۶۲۳ a	۰/۱۹ fg	۰/۰۹۸ e	۰/۶۹ f	۱/۶۶ e	۰/۰۷ g

میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون اختلاف آماری معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد با هم ندارند

کم‌ترین این شاخص (۰/۱۸۳ میلی‌گرم کوئرسیتین در گرم وزن تر) در شرایط تنش خشکی ۱۸٪ و در توده استفاده شده توسط زارعین مشاهده گردید که از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری را با دو توده دیگر نشان نداد (جدول ۳).

فنل کل ریشه و اندام‌های هوایی

مقایسه میانگین‌ها برای اثر متقابل خشکی در توده بذری نشان داد که هر سه توده بذری مورد مطالعه، در شرایط تنش خشکی ۱۸٪ دارای بالاترین محتوای فنل کل ریشه بودند. در صورتی که تحت شرایط بدون تنش هر سه توده گیاه چاودار پایین‌ترین محتوای فنل کل ریشه را به خود اختصاص دادند (جدول ۳). هم‌چنین اثر متقابل خشکی در هورمون مشخص کرد که ترکیب تیماری خشکی ۱۸٪ و عدم محلول‌پاشی هورمون ۲۴-اپی‌براسینولید دارای بیش‌ترینغلظت فنل کل ریشه و اندام‌های هوایی (به ترتیب ۱/۸۱۷ و ۱۴/۵۱ میلی‌گرم گالیک اسید در گرم وزن تر) و ترکیب تیماری محلول‌پاشی با هورمون ۲۴-اپی‌براسینولید تحت شرایط بدون تنش دارای کم‌ترین میزان این شاخص‌ها (به ترتیب ۰/۶۳۶ و ۶/۶۴ میلی‌گرم گالیک اسید در گرم وزن تر) بودند (جدول ۴). نتایج نشان داد که محلول‌پاشی هورمون ۲۴-اپی‌براسینولید تحت تنش‌های ۶،۱۲ و ۱۸٪، محتوای فنل کل ریشه را به ترتیب ۲۴/۶۶، ۲۳/۲۵ و ۱۵/۹ درصد و محتوای فنل کل اندام‌های هوایی را به ترتیب ۳۱/۷۷، ۱۱/۹۷ و ۲۵/۱۵ درصد در مقایسه با عدم محلول‌پاشی کاهش داد (جدول ۴).

شاخص بنیه بذر

نتایج حاصل از مقایسه میانگین‌ها نشان داد که اعمال تنش خشکی سبب کاهش شاخص بنیه بذر توده‌های مورد بررسی چاودار شد، در صورتی که محلول‌پاشی با هورمون ۲۴-اپی‌براسینولید سبب بهبود این شاخص گردید. مقایسه میانگین‌ها برای اثر متقابل دوگانه بین تنش خشکی و توده بذری بیانگر این است که بیش‌ترین شاخص بنیه بذر مربوط به توده جمع آوری شده از مزارع و در شرایط بدون تنش (۱۰/۵) می‌باشد (جدول ۳). هر سه توده مورد مطالعه نیز در شرایط تنش خشکی ۱۸٪ کم‌ترین میزان شاخص بنیه بذر را دارا بودند (جدول ۳). اثر متقابل دوگانه بین هورمون و تنش خشکی نشان داد که بالاترین شاخص بنیه بذر (۱۰/۳۳) با محلول‌پاشی هورمون ۲۴-اپی‌براسینولید تحت شرایط بدون تنش به دست آمد (جدول ۴).

جدول ۴: مقایسه میانگین اثر تنش خشکی در هورمون ۲۴-اپی‌براسینولید بر محتوای گلایسین بتائین و فنل کل ریشه و اندام‌های هوایی و شاخص بنیه بذر

ترکیبات تیماری	گلایسین بتائین ریشه (میکرومول در گرم وزن خشک)	گلایسین بتائین اندام‌های هوایی (میکرومول در گرم وزن خشک)	فنل ریشه (میلی‌گرم گالیک اسید در گرم وزن تر)	فنل اندام‌های هوایی (میلی‌گرم گالیک اسید در گرم وزن تر)	شاخص بنیه بذر
عدم تنش خشکی × عدم مصرف هورمون	۲۳/۳۲ f	۷۶/۶۴ g	۰/۸۳۱ e	۸/۵۲ d	۸/۰۴ b
عدم تنش خشکی × ۲۴-اپی‌براسینولید	۲۴/۴۷ f	۷۷/۶۵ g	۰/۶۳۶ f	۶/۶۴ e	۱۰/۳۳ a
خشکی ۶٪ × عدم مصرف هورمون	۴۰/۷۷ e	۷۳/۴ f	۱/۲ c	۱۰/۴۸ c	۵/۲۱ d
خشکی ۶٪ × ۲۴-اپی‌براسینولید	۴۴/۴۱ d	۹۰/۲۷ e	۰/۹۰۴ d	۷/۱۵ e	۶/۷۸ c
خشکی ۱۲٪ × عدم مصرف هورمون	۴۹/۹ c	۹۶/۵۶ d	۱/۵۲۲ b	۱۲/۲۸ b	۳/۸۱ e
خشکی ۱۲٪ × ۲۴-اپی‌براسینولید	۵۴/۴۱ b	۱۰۳/۲۵ c	۱/۱۶۸ c	۱۰/۸۱ c	۴/۶۳ de
خشکی ۱۸٪ × عدم مصرف هورمون	۵۶/۱۳ b	۱۲۷/۹۳ b	۱/۸۱۷ a	۱۴/۵۱ a	۰/۱۸ f
خشکی ۱۸٪ × ۲۴-اپی‌براسینولید	۶۲/۸۸ a	۱۳۸/۹۸ a	۱/۵۲۸ b	۱۰/۸۶ c	۰/۲۳ f

میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون اختلاف آماری معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد با هم ندارند

پایین‌ترین شاخص بنیه بذر نیز در شرایط عدم کاربرد هورمون ۲۴-اپی‌براسینولید و اعمال تنش خشکی ۱۸٪ (۰/۱۸) بود که از نظر آماری اختلاف معنی‌داری را با مصرف هورمون در چنین سطح تنشی را نشان نداد (جدول ۴). محلول‌پاشی هورمون ۲۴-اپی‌براسینولید در مقایسه با عدم کاربرد در شرایط تنش خشکی ۶٪ شاخص بنیه بذر را ۳۰/۱ درصد، در شرایط تنش خشکی ۱۲٪، ۲۱/۵ درصد و در شرایط تنش خشکی ۱۸٪ نیز ۲۷/۷ درصد افزایش داد (جدول ۴).

گلایسین بتائین ریشه و اندام‌های هوایی

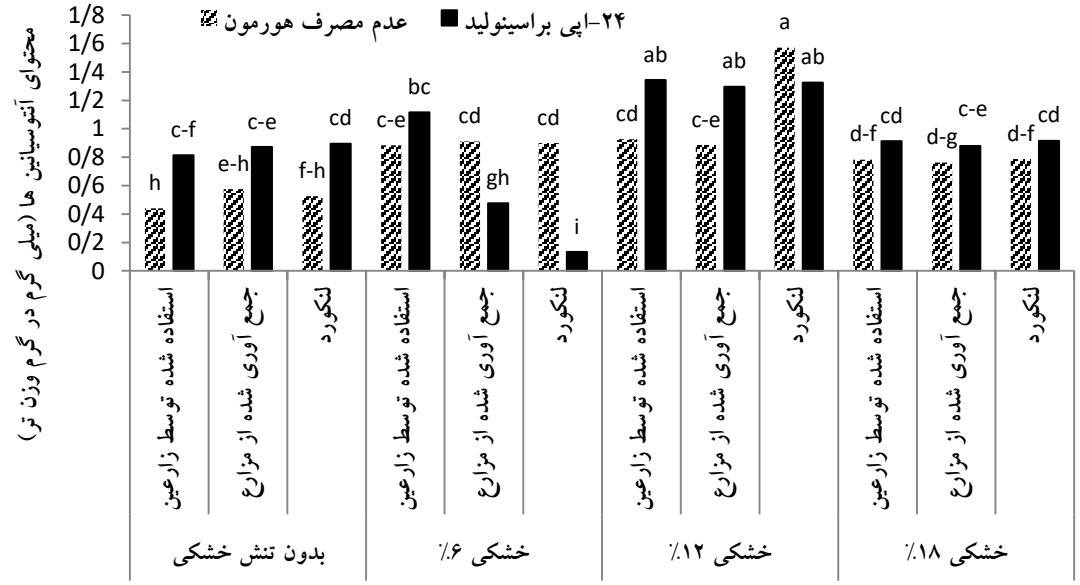
نتایج حاصل از مقایسه میانگین‌ها نشان داد که اعمال تنش خشکی و محلول‌پاشی هورمون ۲۴-اپی‌براسینولید سبب افزایش محتوای گلایسین بتائین ریشه و اندام‌های هوایی گردید. بر اساس نتایج مشاهده شده برای اثر دوگانه خشکی در هورمون مشخص گردید که حداکثر محتوای گلایسین بتائین ریشه (۶۲/۸۸ میکرومول در گرم وزن خشک) و اندام‌های هوایی (۱۳۸/۹۸ میکرومول در گرم وزن خشک) در حالت محلول‌پاشی با هورمون ۲۴-اپی-براسینولید و در شرایط خشکی ۱۸٪ به دست آمد. این در حالی است که کم‌ترین محتوای آن‌ها نیز در شرایط بدون کاربرد هورمون و عدم تنش خشکی حاصل گردید که از نظر آماری اختلاف معنی‌داری با تیمار محلول‌پاشی در این سطح تنش نشان ندادند (جدول ۴). محلول‌پاشی با هورمون ۲۴-اپی‌براسینولید در مقایسه با عدم محلول‌پاشی محتوای گلایسین بتائین ریشه را تحت شرایط تنش ۶، ۱۲ و ۱۸٪ به ترتیب ۸/۹۲، ۹/۰۳ و ۱۲/۰۲ درصد و در اندام-های هوایی نیز به ترتیب ۸/۲۳، ۶/۹۲ و ۸/۶۳ درصد افزایش داد (جدول ۴).

آنتوسیانین‌های ریشه و اندام‌های هوایی

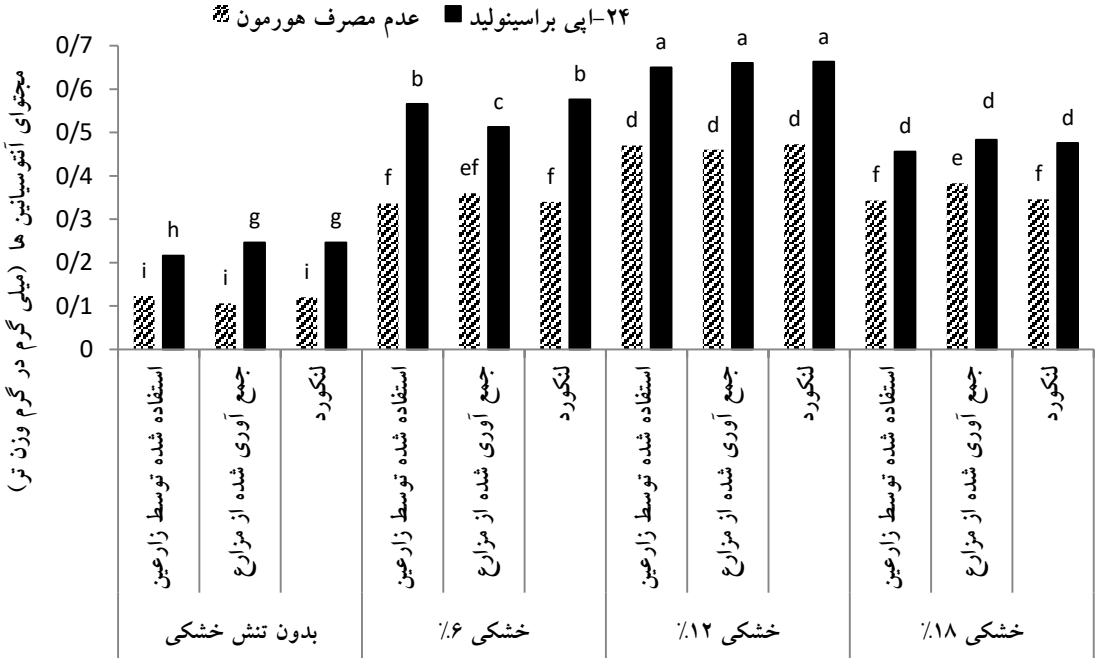
محتوای آنتوسیانین‌ها در ریشه و اندام‌های هوایی تحت تأثیر محلول‌پاشی هورمون ۲۴-اپی‌براسینولید و نیز اعمال تنش خشکی افزایش یافت. تنش خشکی ۱۲٪ در مقایسه با سایر سطوح تنشی تأثیر بیش‌تری در افزایش آنتوسیانین-های ریشه و اندام‌های هوایی داشت. مقایسه میانگین اثر سه گانه تیمارهای مورد بررسی نشان داد که بالاترین غلظت آنتوسیانین‌ها در اندام‌های هوایی (۱/۵۷ میلی‌گرم در گرم وزن تر) در ترکیب تیماری عدم محلول‌پاشی با هورمون ۲۴-اپی‌براسینولید × توده بذری لنکورد × خشکی ۱۲٪ به دست آمد که از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری را با توده لنکورد، جمع‌آوری شده از مزارع و استفاده شده توسط زارعین در شرایط خشکی ۱۲٪ و محلول‌پاشی با هورمون ۲۴-اپی‌براسینولید نشان نداد (شکل ۱). کم‌ترین محتوای آنتوسیانین‌ها در اندام‌های هوایی نیز متعلق به ترکیب تیماری توده لنکورد × محلول‌پاشی هورمون ۲۴-- اپی براسینولید × خشکی ۶٪ بود (شکل ۱). هم‌چنین بالاترین غظلت آنتوسیانین‌ها در ریشه در هر سه توده بذری مورد مطالعه و با محلول‌پاشی هورمون ۲۴-اپی-براسینولید تحت شرایط تنش خشکی ۱۲٪ مشاهده گردید. کم‌ترین مقدار آن نیز تحت شرایط بدون تنش، عدم محلول‌پاشی با هورمون و در هر سه توده مورد مطالعه به دست آمد (شکل ۲).

درصد جوانه‌زنی

اعمال تنش خشکی سبب کاهش درصد جوانه‌زنی بذر توده‌های مورد بررسی چاودار گردید. از طرفی محلول-پاشی با هورمون ۲۴-اپی‌براسینولید سبب بهبود این شاخص گردید. اثر متقابل سه‌گانه تنش خشکی، توده بذری و هورمون نشان داد که توده لنکورد در شرایط بدون تنش خشکی و محلول‌پاشی با هورمون ۲۴-اپی‌براسینولید بالاترین (۸۲/۳ درصد) درصد جوانه‌زنی را به خود اختصاص داد که اختلاف معنی‌داری را با توده جمع‌آوری شده از مزارع در چنین شرایطی نداشت (شکل ۳). توده لنکورد تحت شرایط تنش خشکی ۱۸٪ و عدم مصرف هورمون ۲۴-اپی‌براسینولید پایین‌ترین (۲/۴۳ درصد) درصد جوانه‌زنی را دارا بود (شکل ۳).



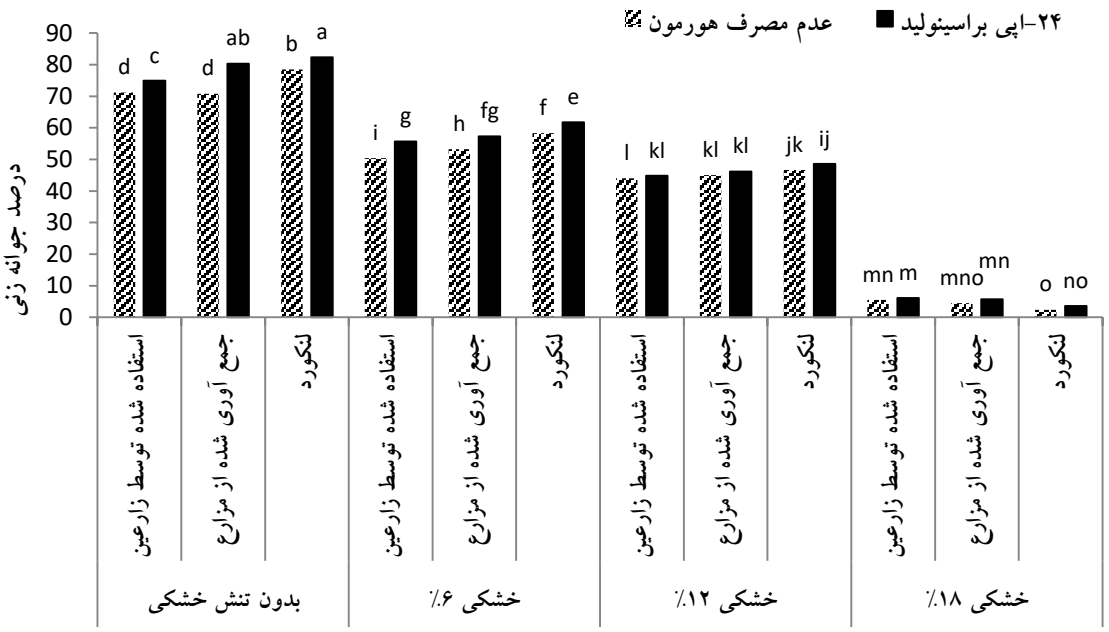
شکل ۱: مقایسه میانگین‌های اثر سه‌گانه ترکیبات تیماری بر محتوای آنتوسیانین‌ها در اندام‌های هوایی گیاه چاودار.



شکل ۲: مقایسه میانگین‌های اثر سه‌گانه ترکیبات تیماری بر محتوای آنتوسیانین‌های ریشه گیاه چاودار.

بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر تنظیم‌کننده رشد گیاهی ۲۴-اپی-براسینولید بر واکنش‌های مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی سه توده گیاه چاودار در شرایط تنش خشکی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تنش خشکی سبب کاهش صفات مورفولوژیکی (وزن خشک و طول ریشه و اندام-های هوایی، شاخص بنیه بذر و درصد جوانه‌زنی) و محتوای فلاونویدها در ریشه و اندام‌های هوایی گردید، در صورتی که محتوای برخی متابولیت‌ها نظیر گلایسین بتائین، فنل کل و آنتوسیانین‌ها را در ریشه و اندام‌های هوایی افزایش داد.



شکل ۳: مقایسه میانگین اثر سه‌گانه ترکیبات تیماری بر درصد جوانه‌زنی توده های مختلف گیاه چاودار.

محلول‌پاشی هورمون ۲۴-اپی‌براسینولید بر تمام شاخص-های مورد مطالعه به غیر از محتوای فنل کل ریشه و اندام-های هوایی تأثیر مثبتی داشت. سیدشریفی و سیدشریفی (۱۳۸۷) گزارش کرده‌اند که با افزایش سطح تنش خشکی وزن خشک گیاهچه، ساقه‌چه و ریشه‌چه گلرنگ کاهش معنی‌داری می‌یابد (۱۳). حسینی و همکاران (۱۳۹۵) نشان دادند که تنش خشکی سبب کاهش وزن تر و خشک ریشه و اندام‌های هوایی و نیز طول ریشه در دو لاین تریتیکاله می‌گردد (۸). کاهش وزن خشک ریشه چاودار و گندم تحت تنش خشکی در مطالعات دیگر نیز گزارش شده است (۲۰). کاهش وزن خشک ریشه و اندام‌های هوایی در اثر تنش رطوبتی را می‌توان به اختلال در فرآیند فتوسنتز و کاهش تولید مواد فتوسنتزی جهت انتقال به اندام‌های در حال رشد نسبت داد (۶۸). در این راستا، میشل و همکاران (۲۰۰۹) بیان کردند که تنش خشکی سبب کاهش فتوسنتز می‌گردد و نیازهای قندی برای تنظیم اسمزی سلول افزایش می‌یابد، در نتیجه میزان دسترسی به مواد فتوسنتزی و نهایتا کاهش رشد ریشه اتفاق می‌افتد (۷۰). بهنام‌نیا و همکاران (۲۰۰۹) گزارش کردند که تنش خشکی باعث کاهش و تیمار ۲۴-اپی‌براسینولید سبب افزایش وزن تر و خشک گیاه گوجه فرنگی می‌گردد (۳۹). در پژوهشی مشخص شد که محلول‌پاشی غلظت‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر براسینواستروئید منجر به افزایش طول گیاهچه‌های گندم و وزن تر و خشک آن‌ها می‌شود (۴۶). افزایش وزن ریشه در نتیجه استفاده از براسینواستروئیدها را می‌توان به افزایش فعالیت اینورتاز در برگهای جوان نسبت داد که سبب بالا رفتن آسیمیلاسیون قندها در گیاهان و در نتیجه رشد بیش‌تر ریشه گیاهان می‌شود (۸۲).

طول ریشه شاخصی جهت ارزیابی توانایی گیاهان در جذب آب از لایه‌های زیرین خاک و نفوذپذیری بهتر ریشه‌ها در خاک به شمار می‌رود. بنابراین، آگاهی از وضعیت طول ریشه، شکل سیستم ریشه‌ای و پراکندگی آن در خاک از اهمیت بالایی برخوردار است (۹۱). گزارش شده است که تنش خشکی سبب کاهش طول و وزن خشک ساقه و ریشه می‌گردد (۲۸ و ۶۹). حسینعلی‌پور و همکاران (۱۳۹۹) اظهار داشتند که تنش خشکی سبب کاهش طول ریشه ارقام مختلف گندم گردید (۷). در این پژوهش مشخص گردید که کاهش طول ریشه سبب کاهش

وزن خشک آن شده است. در مطالعات قبلی نیز کاهش وزن خشک ریشه گندم به دلیل کاهش طول ریشه در شرایط شوری گزارش شده است (۵۰). امینی و همکاران (۱۳۹۴) گزارش کردند که کابرد هورمون ۲۴-اپی‌براسینولید سبب افزایش طول ریشه‌چه و ساقه‌چه گیاهچه‌های بادمجان تحت شرایط تنش سرمایی می‌گردد (۲). بهبود رشد ریشه‌چه و ساقه‌چه با کاربرد هورمون ۲۴-اپی-براسینولید را می‌توان به توانایی آن در تحریک رشد و توسعه سلولی مرتبط دانست (۷۵).

فلاوونوئیدها جزء ترکیبات آنتی‌اکسیدانی غیرآنزیمی هستند که نقش‌های مختلفی در گیاهان از جمله محافظت از تنش-های محیطی، رنگی شدن گل و دانه و جوانه‌زنی لوله گرده دارند (۵۵). هم‌چنین فلاونوئیدها به‌عنوان یک آنتی‌اکسیدان قوی به طور مستقیم در پاکسازی گونه‌های فعال اکسیژن عمل می‌کنند (۶۰) بیوسنتز فلاونوئیدها اغلب در پاسخ به عوامل تنش خارجی مانند خشکی، سرما و شوری و ... افزایش می‌یابد (۵۷). در این راستا عنوان شده است که تنش خشکی در گیاهان سبب تجمع فلاونوئیدها می‌شود (۵۵). از طرفی در برخی منابع به کاهش محتوای فلاونوئیدها تحت شرایط تنش اشاره گردیده است، به طوری که رضایی‌فر و همکاران (۱۳۹۷) گزارش کردند که تحت تنش خشکی و اشعه فرابنفش محتوای فلاونوئیدها در رقم پیشگام گندم کاهش می‌یابد (۱۲). کاهش محتوای فلاونوئیدها در گندم در اثر تنش کم آبی در مطالعات دیگر نیز گزارش شده است (۴). اعلام شده است که در شرایط تنش، پیش از آن‌که سیستم آنزیمی شروع به فعالیت کند، فلاونوئیدها به عنوان محافظت کننده گیاه در برابر تنش عمل می‌کنند، اما با افزایش تنش، سیستم آنزیمی وارد عمل می‌شود و از محتوای فلاونوئیدها کاسته می‌شود (۱۸). گزارش گردیده است که کاربرد خارجی براسینواستروئید می‌تواند فعالیت ترکیبات آنتی‌اکسیدانی مقابله کننده با تنش اکسیداتیو مثل فلاونوئیدها و ترکیبات فنلی را افزایش دهد (۸۰). دارابی و همکاران (۱۳۹۹) بیان داشتند که محلول-پاشی براسینواستروئید و پوتریسین سبب افزایش محتوای فلاونوئیدهای گیاه ریحان در شرایط تنش خشکی می‌گردد (۱۱).

افزایش غلظت ترکیبات فنلی یکی از پاسخ‌های دفاعی گیاهان در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی هستند و بسیاری از آن‌ها به‌عنوان آنتی‌اکسیدان عمل می‌کنند. در بین ترکیبات فنلی، فنل کل نقش بسیار مهمی در افزایش تحمل به تنش اسمزی ایفا می‌کند (۸۱). هم‌چنین، این ترکیبات جزء آنتی‌اکسیدان‌ها به شمار می‌روند و در شرایط تنش اکسیداتیو در پاکسازی گونه‌های منفرد آزاد اکسیژن نقش دارند (۴۸) و می‌توانند به طور مؤثری رادیکال‌های گروه هیدروکسیل و پروکسیل را مهار کنند و از پراکسیداسیون لیپیدها جلوگیری نمایند (۴۰). بهبود تحمل به خشکی تحت تأثیر ترکیبات فنلی گزارش شده است (۲۹ و ۳۰). آندره و همکاران (۲۰۰۹) در تحقیقی بر روی سیب‌زمینی، گزارش کردند که ژن تولید کننده فنل در گیاه در شرایط تنش خشکی بیان می‌گردد و میزان این ترکیب‌ها افزایش می‌یابد (۳۵). افزایش محتوای ترکیبات فنلی در گیاهان زیتون (۷۳) و ذرت (۷۲) گزارش شده است. کاهش محتوای فنل کل در گیاه کتان با کاربرد هورمون ۲۴-اپی-براسینولید تحت شرایط تنش خشکی نیز گزارش شده است (۲۶). در این راستا گزارش گردیده است که محتوای فنل کل تحت تأثیر کاربرد اپی‌براسینولید به دلیل افزایش رشد و کاهش تنش اکسیداتیو ناشی از فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کاهش پیدا می کند (۲۵ و ۵۹).

در این پژوهش تنش خشکی سبب کاهش بنیه بذر توده-های مورد بررسی چاودار گردید. کاهش بنیه بذر گیاه ذرت تحت تنش خشکی در مطالعات فرهادی و همکاران (۱۳۹۴) گزارش شده است (۱۶). هم‌چنین در پژوهشی عنوان شده است که تنش خشکی سبب کاهش بنیه بذر، درصد جوانه‌زنی و رشد گیاهچه‌های ارقام سویا می‌گردد (۱۷). عالیپور و همکاران (۱۳۹۸) بیان داشتند که شاخص

بنیه بذر گیاهچه‌های جودره تحت تنش شوری و خشکی کاهش می‌یابد (۱۴). از آن‌جایی که شاخص بنیه بذر از حاصل‌ضرب طول گیاهچه و درصد جوانه‌زنی حاصل می‌شود، بنابراین کاهش این شاخص در شرایط تنش خشکی را می‌توان به کاهش درصد جوانه‌زنی و طول گیاهچه تحت تنش خشکی نسبت داد (۲۷). هم‌چنین گزارش گردیده است که تنش خشکی از طریق کاهش پتانسیل آب، موجب کاهش دسترسی بذر به آب می‌گردد و در نتیجه سرعت فرآیندهای متابولیکی مختل شده و از این طریق سبب کاهش بنیه بذر می‌گردد (۵). شتیوی و همکاران (۲۰۱۸) اظهار داشتند که کاربرد تنظیم‌کننده رشد متیل جاسمونات موجب افزایش بنیه بذر گیاه برنج می‌شود (۸۳).

یکی از پاسخ‌های گیاهان به تنش‌های محیطی افزایش تولید و انباشت انواع مختلف مواد آلی محلول سازگار در سلول‌های گیاهی است. این مواد به واسطه وزن مولکولی کم، از محلولیت بالایی برخوردار هستند و در تنظیم اسمزی گیاه در شرایط تنش نقش دارند. از جمله این ترکیبات سازگار می‌توان به پرولین، ساکارز و گلایسین بتائین اشاره کرد. گلایسین بتائین یک ترکیب آمونیومی چهارگانه است که به عنوان یک محافظت کننده اسمزی قوی در مواجه با تنش خشکی به حساب می‌آید. گلایسین بتائین علاوه بر نقش تنظیم اسمزی به عنوان یک جاروب کننده گونه‌های فعال اکسیژن نیز عمل می‌کند (۳۷). علیو و همکاران (۲۰۱۵) گزارش کردند که با افزایش شدت تنش اسمزی غلظت گلایسین بتائین و پرولین در گیاهچه‌های ذرت نسبت به شاهد افزایش می‌یابد (۳۱). کیخا و همکاران (۱۳۹۸) گزارش دادند که تنش خشکی سبب افزایش محتوای گلایسین بتائین در گونه‌های وحشی و زراعی گندم می‌شود (۱۹). افزایش محتوای گلایسین بتائین در پاسخ به تنش‌های محیطی در بسیاری از گیاهان دیگر نظیر ذرت (۹۵) و سورگوم (۹۴) گزارش شده است. در پژوهشی عنوان شده است که براسینواستروئیدها بر تجمع مواد محلول اثر مثبت دارند و باعث افزایش سازگاری اسمزی در گیاهان می‌شوند (۱). کاردوسو و همکاران (۲۰۱۹) اعلام داشتند که کاربرد هورمون ۲۴-اپی‌براسینولید سبب تجمع گلایسین بتائین در گیاهان دو رقم لوبیا چشم بلبلی می‌گردد (۴۳). همچنین راتان و همکاران (۲۰۲۰) نیز افزایش محتوای گلایسین بتائین در گیاهچه‌های ذرت را تحت تأثیر هورمون براسینواستروئید گزارش کرده‌اند (۷۹).

آنتوسیانین‌ها یکی از زیرگروه‌های ترکیبات فلاونوئیدی و از رنگیزه‌های محلول در آب هستند (۵۷). فعالیت فیزیولوژیک آن‌ها به دلیل افزایش توان آنتی‌اکسیدانتی می‌باشد (۸۷). تجمع آنتوسیانین در پاسخ به تنش‌های مختلف مانند خشکی، شوری، نور زیاد، سرما، قرار گرفتن در معرض اشعه ماوراء بنفش، آلودگی، تنش اسمزی و کمبود عناصر غذایی گزارش شده است (۶۲). عمومبیگی و رضوی‌زاده (۱۳۹۲) در کلزا و خیری سیس و همکاران (۱۴۰۰) در گندم بیان داشتند که تنش خشکی موجب افزایش محتوای آنتوسیانین‌ها می‌گردد (۱۵ و ۱۰). القای سنتز آنتوسیانین‌ها در شرایط تنش می‌تواند به‌دلیل نقش حفاظتی آن در ساختارهای فتوسنتزی باشد، زیرا این رنگیزه‌ها مسئول مهار رادیکال‌های آزاد اکسیژن و جلوگیری از پراکسیداسیون لیپیدها و در نهایت تنش اکسیداتیو می‌باشند. آنتوسیانین‌ها انرژی زیادی را از فتوسیستم نوری یک و دو به صورت گرما یا واکنش‌های شیمیایی بی‌ضرر دفع می‌کنند و از این طریق سبب محافظت از غشاهای کلروپلاستی می‌شوند (۶۳). محققان گزارش کرده‌اند که براسینواستروئیدها باعث افزایش سنتز متابولیتهای سازگار می‌شوند و اثرات تنش را در گیاهان کاهش می‌دهند (۹۷). محمدرضاخانی و همکاران (۱۳۹۵) بیان داشتند که محتوای آنتوسیانین‌ها در گیاه توت‌فرنگی با کاربرد سطوح مختلف براسینواسترویید افزایش می‌یابد (۲۱). افزایش محتوای آنتوسیانین‌ها در گیاه کتان با کاربرد هورمون ۲۴-اپی‌براسینولید تحت شرایط تنش خشکی گزارش شده است (۲۶). عباس و همکاران (۲۰۱۳) نیز

اظهار داشتند که کاربرد براسینواستروئید موجب افزایش محتوای آنتوسیانین‌ها در دو رقم فلفل می‌شود (۲۴).

یکی از مراحل مهم در چرخه زندگی گیاه، جوانه‌زنی است که می‌تواند نقش مهمی در میزان تولید و عملکرد گیاهان داشته باشد (۶۹). بیان شده است که تنش خشکی به واسطه کاهش پتانسیل اسمزی بذر سبب افت درصد و سرعت جوانه‌زنی می‌گردد (۸۴). مطالعات نشان داده‌اند که براسینواستروئیدها بر جوانه‌زنی بذر گیاهان تأثیرگذار هستند. در این زمینه افزایش درصد جوانه‌زنی بذر گیاهان برنج (۷۵)، سورگوم (۹۰) و اطلسی (۲۲) تحت تأثیر کاربرد براسینواستروئیدها گزارش شده است. در ابتدا به نظر می‌رسید که براسینواستروئیدها در شکستن پوسته بذر دخالت دارند (۸۸)، اما مطالعات بعدی مشخص کرد که براسینواستروئیدها از طریق تحریک طویل شدن محور زیرلپه (هیپوکوتیل) و نمو رویان در بهبود جوانه‌زنی نقش دارند (۶). مشخص شده است که هورمون ۲۴-اپی-براسینولید نقشی شبیه به جیبرلین در افزایش جوانه‌زنی دارد و احتمالاً کاهش بیوسنتز آبسیزیک اسید و یا افزایش بیوسنتز جیبرلین، دلیل افزایش جوانه‌زنی تحت تأثیر هورمون ۲۴-اپی‌براسینولید می‌باشد (۸۶).

بر اساس نتایج به دست آمده گیاه‌چه‌های رقم لنکورد با دارا بودن بیش‌ترین درصد جوانه‌زنی و نیز بهبود مکانیسم-های دفاعی غیرآنزیمی از قبیل تجمع فنل و آنتوسیانین میزان تحمل بیش‌تری را به تنش خشکی در مقایسه با دو توده مورد مطالعه دیگر داشتند. به نظر می‌رسد تجمع آنتی-اکسیدان‌های غیرآنزیمی در اثر اعمال تنش خشکی و محلول‌پاشی هورمون ۲۴-اپی‌براسینولید توانسته است تا حدودی سبب تعدیل اثرات زیانبار ناشی از تنش خشکی گردد. نتایج حاکی از آن است که استفاده از تنظیم‌کننده رشد گیاهی ۲۴-اپی‌براسینولید می‌تواند آستانه تحمل به تنش خشکی و رشد و نمو چاودار را در مناطقی که در معرض تنش خشکی قرار دارند، از طریق تنظیم پاسخ‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی بهبود بخشد.

سپاسگزاری

بدین وسیله نویسندگان مقاله از حمایت‌ها و مساعدت‌های دانشکده علوم، گروه علوم گیاهی و کارشناسان آزمایشگاه-های فیزیولوژی و ژنتیک دانشکده علوم دانشگاه ارومیه جهت فراهم نمودن امکانات لازم برای اجرای این پژوهش تشکر و قدردانی می نمایند.

منابع

۱. احمدی موسوی، ع. ا.، منوچهری کلانتری، خ.، ترک‌زاده، م. (۱۳۸۴). اثر نوعی براسینواستروئید (24epibrassinolide) بر مقدار تجمع مالون د آلدهید، پرولین، قند و رنگیزه‌های فتوسنتزی در گیاه کلزا (*Brasica napus* L.) تحت تنش کم آبی. *زیست‌شناسی ایران*، ۱۸(۴)، ۳۰۶-۲۹۵.

۲. امینی، ف.، شریعت‌زاده، ش.، عسکری، م. (۱۳۹۴). بررسی اثر ۲۴-اپی‌براسینولید بر افزایش تحمل به سرما در گیاهچه بادمجان (*Solanum melongena* L.). *به‌زراعی کشاورزی*، ۱۷(۳)، ۷۴۳-۷۵۳.

۳. ایران‌نژاد، ح.، شهبازیان، ن. (۱۳۸۴). *زراعت غلات* (جلد دوم). ایران. انتشارات کارنو، ۳۸۸ صفحه.

۴. بلوچی، ح. ر.، مدرس ثانوی، س. ع. م.، امام. ی.، برزگر، م. (۱۳۸۷). تاثیر تنش کم آبی، ازدیاد دی اکسید کربن و اشعه UV بر صفات کیفی برگ پرچم گندم دوروم (*Triticum turgidum* L.). *علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی*، ۱۲(۴۵)، ۱۶۷-۱۸۱.

۵. جهانبخش، س.، پرمون، ق.، جودی، ز. (۱۳۹۸). تأثیر تنش خشکی و شوری بر جوانه‌زنی، استقرار و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت اکوتیپ‌های مختلف بابونه (*Matricaria chamomilla* L.). *فرآیند و کارکرد گیاهی*، ۸(۳۰)، ۱-۱۹.

۶. جهانی دوقزلو، م.، امام، ی. (۱۳۹۶). تأثیر سالیسیلیک اسید و براسینواستروئید در تعدیل اثرات تنش آبی در دو رقم گندم (*Triticum aestivum*). *نشریه تولید و فرآوری محصولات زراعی و باغی*، ۷(۱)، ۱۳۹-۱۲۷.

۷. حسینعلی‌پور، ب.، راهنما، ا.، فرخیان فیروزی، ا. (۱۳۹۹). اثر تنش خشکی بر رشد و معماری ریشه گندم در مرحله رشد رویشی. *علوم گیاهان زراعی*، ۵۱(۱)، ۶۳-۷۵.

۸. حسینی، س. س.، چنیانی، م.، لاهوتی، م.، گنجعلی، ع. (۱۳۹۵). بررسی میزان مقاومت به تنش خشکی گیاهچه‌های دو لاین گیاه ترتیتیکاله (*Triticosecale* × *Wittmack*) با تأکید بر برخی آنتی-اکسیدان‌های آنزیمی و غیرآنزیمی. *زیست‌شناسی گیاهی ایران*، ۸(۳۰)، ۴۲-۲۷.

۹. خزاعی، ح. ر.، نظامی، ا.، شجاعی نوفرست، ک. (۱۳۸۹). تأثیر محدودیت رطوبتی بر عملکرد و توزیع ماده خشک بین اندام‌های هوایی و ریشه تک بوته ژنوتیپ‌های تریتیکاله (Triticosecale×Wittmack) تحت شرایط کنترل شده. نشریه اقتصاد و توسعه منطقه‌ای، ۲(۱)، ۱۶۲-۱۷۴.

۱۰. خیری سیس، م.، جهانبخش گده کهریز، س.، رئیسی ساداتی، س. ی. (۱۴۰۰). تأثیر پوترسین در افزایش تحمل گندم به تنش خشکی بر برخی شاخص‌های بیوشیمیایی در گندم. *مجله پژوهشهای گیاهی (مجله زیست‌شناسی ایران)*، ۳۴(۲)، ۴۶۷-۴۷۸.

۱۱. دارابی، ف.، عباسی، ن. ا.، زارع، م. ج. (۱۳۹۹). ارزیابی تأثیر پوتریسین و براسینواستروئید در القای تحمل به خشکی و تغییر فعالیت‌های فیزیولوژیکی در گیاه ریحان (*Ocimum basilicum* L.). *تنش‌های محیطی در علوم زراعی*، ۱۳(۴)، ۱۱۸۳-۱۲۰۲.

۱۲. رضایی‌فر، ز.، فلاحی، س.، قلی‌نژاد، ا. (۱۳۹۷). تأثیر تنش خشکی و اشعه ماوراءبنفش (UV-C) بر سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی آنزیمی و غیرآنزیمی در سه رقم گندم (*Triticum aestivum* L.). *فرآیند و کارکرد گیاهی*، ۷(۲۴)، ۱۵۵-۱۷۱.

۱۳. سیدشریفی ر.، سیدشریفی، ر. (۱۳۸۷). بررسی اثرات PEG بر جوانه-زنی و رشد گیاهچه ارقام گلرنگ. *زیست‌شناسی ایران*. ۲۱(۳)، ۴۰۰-۴۱۰.

۱۴. عالیپور، س.، رستمی، ط.، غلامی، ش. (۱۳۹۸). بررسی اثر تنش شوری و خشکی ناشی از غلظت‌های مختلف کلرید سدیم و پلی‌اتیلن گلیکول بر خصوصیات جوانه‌زنی و رشد گیاهچه در جودره (*Hordeum spontaneum Koch*). *نشریه تحقیقات بذر*، ۹(۲)، ۵۱-۴۱.

۱۵. عموبیگی، م.، رضوی‌زاده، ر. (۱۳۹۲). تأثیر تنش خشکی و پاکلوبوترازول بر میزان تجمع فلاونوئیدها و عناصر معدنی در گیاه کلزا (*Brassica napus* L.) در شرایط کشت درون شیشه. *پژوهش-های اکوفیزیولوژی گیاهی ایران*، ۸(۳)، ۱۲-۲۲.

۱۶. فرهادی، ا.، دانشیان، ج.، حمیدی، آ.، شیرانی‌راد، ا. ح.، ولدآبادی، س. ع. (۱۳۹۴). تأثیر دور آبیاری و سطوح مختلف نیتروژن بر تغذیه گیاه والد و بنیه بذر و برخی صفات مرتبط دورگ سینگل کراس 704 در کرمانشاه. *نشریه علوم و فناوری بذر ایران*، ۴(۲)، ۱۱۹-۱۳۶.

۱۷. فرهودی، ر.، مدحج، ع.، پاینده، خ. (۱۳۹۳). اثر تنش خشکی پایان فصل بر فتوسنتز، عملکرد دانه و بنیه بذر پنج رقم سویا. *فیزیولوژی گیاهان زراعی*، ۶(۲۴)، ۴۱-۵۵.

۱۸. قربانلی، م.، بخشی خانکی، غ.، ذاکری. ا. (۱۳۹۰). بررسی اثر تنش خشکی بر ترکیب‌های آنتی‌اکسیدان در گیاه دارویی کتان (*Linum usitatissimum* L.). *فصلنامه علمی-پژوهشی تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران*، ۲۷(۴)، ۶۵۸-۶۴۷.

۱۹. کیخا، م.، مهدی‌نژاد، ن.، فاخری، ب.، محمدی، ر. (۱۳۹۸). مکانیسم تحمل به خشکی و بیان ژن‌های دخیل در تنظیم اسمزی در برخی گونه‌های زراعی و وحشی گندم. *ژنتیک نوین*، ۱۴(۲)، ۱۱۱-۱۲۳.

۲۰. گلستانی‌فر، ف.، محمودی، س.، زمانی، غ.، سیاری زهان، م. ح. (۱۳۹۶). اثر تنش خشکی بر کارایی مصرف آب و وزن خشک ریشه گندم (*Triticum aestivum* L.) و چاودار (*Secale cereal* L.) در شرایط رقابت. *نشریه پژوهش‌های زراعی ایران*، ۱۵(۲)، ۴۵۰-۴۳۸.

۲۱. محمدرضاخانی، س.، پاک‌کیش، ز.، رفیعی، س. (۱۳۹۵). نقش براسینواستروئید روی بهبود ویژگی‌های کیفی میوه توت‌فرنگی رقم پاروس. *نشریه علوم باغبانی (علوم و صنایع کشاورزی)*، ۳۰(۲)، ۳۱۶-۳۲۶.

۲۲. هاشمی، س. ح.، علومی، ح.، رضانژاد، ف.، منوچهری کلانتری، خ. (۱۳۹۵). اثر ۲۴-اپی‌براسینولید بر جوانه‌زنی و رشد لوله گرده اطلسی (*Petunia hybrid* L.) تحت تنش کادمیوم. *مجله پژوهشهای گیاهی (مجله زیست‌شناسی ایران)*، ۲۹(۲)، ۴۶۱-۴۵۱.

۲۳. یوسفی، م.، نصراله‌زاده اصل، و.، محرم‌نژاد، س. (۱۳۹۶). بررسی عملکرد دانه، میزان کلروفیل، مواد اسمولیتی، فنل کل و فعالیت آنزیم کاتالاز ذرت (*Zea mays* L.) در پاسخ به تنش خشکی. *نشریه فیزیولوژی محیطی گیاهی*، ۱۲(۴۶)، ۱-۱۴.

24. Abbas, S., Latif, H. H. & Elsherbiny, E. A. (2013). Effect of 24-epibrassinolide on the physiological and genetic changes on two varieties of pepper under salt stress conditions. *Pakistan Journal of Botany*, 45(4), 1273-1284.

25. Aghaee, P. & Rahmani, F. (2019). Biochemical and molecular responses of flax to 24-epibrassinosteroide seed priming under drought stress. *Journal of Plant Interactions*, 14(1), 242-253.

26. Aghaee, P. & Rahmani, F. (2020). Seed priming with 24-epibrassinolide alters growth and phenylpropanoid pathway in Flax in response to water deficit. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 22(4), 1039-1052.

27. Agrawal, R. L. (1991). Seed Technology. Second edition, Oxford and IBH press. New York and London, 445 pp.

28. Ahmed, S., Nawata, E., Hosokawa, M., Domae, Y. & Sakuratani, T. (2002). Alterations in photosynthesis and

some antioxidant enzymatic activities of *mungbean* subjected to waterlogging. *Plant Science*, 163(1), 117-123.

29. Akula, R. & Ravishankar, G. A. (2011). Influence of abiotic stress signals on secondary metabolites in plants. *Plant Signaling and Behavior*, 6(11), 1720-1731.
30. Al Hassan, M., Fuertes, M. M., Sanchez, F. J. R., Vicente, O. & Boscaiu, M. (2015). Effects of salt and water stress on plant growth and on accumulation of osmolytes and antioxidant compounds in cherry tomato. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 43(1), 1-11.
31. Aliu, S., Rusinovci, I., Fetahu, S., Gashi, B., Simeonovska, E. & Rozman, L. (2015). The effect of salt stress on the germination of maize (*Zea mays* L.) seeds and photosynthetic pigments. *Acta Agriculturae Slovenica*, 105, 85-94.
32. Allen, T. (2002). The world supply of fall (winter) rye. *Crop Development Center, University of Saskatchewan: Saskatoon, SK, Canada*.
33. Andersson, R., Fransson, G., Tietjen, M. & Åman, P. (2009). Content and molecular-weight distribution of dietary fiber components in whole-grain rye flour and bread. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(5), 2004-2008.
34. Andlauer, W. & Fürst, P. (1999). Does cereal reduce the risk of cancer?. *Cereal Foods World*, 44, 76-78.
35. André, C. M., Schafleitner, R., Legay, S., Lefèvre, I., Aliaga, C. A. A., Nomberto, G., Hoffmann, L., Hausman, J. F., Larondelle, Y. & Evers, D. (2009). Gene expression changes related to the production of phenolic compounds in potato tubers grown under drought stress. *Phytochemistry*, 70(9), 1107-1116.
36. Arora, N., Bhardwaj, R., Sharma, P. & Arora, H. K. (2008). 28-Homobrassinolide alleviates oxidative stress in salt-treated maize (*Zea mays* L.) plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 20, 153-157.
37. Ashraf, M. & Foolad, M. R. (2007). Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environmental and Experimental Botany*, 59(2), 206-216.
38. Ayala-Zavala, J. F., Wang, S. Y., Wang, C. Y. & González-Aguilar, G. A. (2005). Methyl jasmonate in conjunction with ethanol treatment increases antioxidant capacity, volatile compounds, and postharvest life of strawberry fruit. *European Food Research and Technology*, 221, 731-738.
39. Behnamnia, M., Kalantari, K. M. & Ziaie, J. (2009). The effects of brassinosteroid on the induction of biochemical changes in *Lycopersicon esculentum* under drought stress. *Turkish Journal of Botany*, 33(6), 417-428.
40. Boscaiu, M., Sánchez, M., Bautista, I., Donat, P., Lidón, A., Llinares, J., Llul, C., Mayoral, O. & Vicente, O. (2010). Phenolic compounds as stress markers in plants from gypsum habitats. *Bulletin of the University of Agricultural Sciences & Veterinary Medicine Cluj-Napoca. Horticulture*, 67(1), 44-49.
41. Bushuk, W. (2001). *Rye: Production, Chemistry and Technology*. St. Paul, MN, USA: (No. Ed. 2). American Association of Cereal Chemists.
42. Bushuk, W. (2004). 'Rye', in Wrigley, C., Walker, C., and Corke, H., eds, *Encyclopedia of Grain Science, Vol.3*, Oxford, UK, Elsevier Ltd, 85–91.
43. Cardoso, K. P. S., Silva Conceicao, S., de Araújo Brito, A. E., da Silva Martins, J. T., Machado, L. C., Correa Costa, T., dos Santos Nogueira, G. A., do Nascimento, V. R., da Silva, R. P. P., Costa Paiva, R. & Correa Barbosa, A. V. (2019). Biochemical metabolism of two cultivars of cowpea treated with 24-Epibrassinolide and subjected to saline stress. *Australian Journal of Crop Science*, 13(3), 444-451.
44. Crusciol, C. A., Pulz, A. L., Lemos, L. B., Soratto, R. P. & Lima, G. P. (2009). Effects of silicon and drought stress on tuber yield and leaf biochemical characteristics in potato. *Crop Science*, 49(3), 949-954.
45. Divya, P., Puthusseri, B. & Neelwarne, B. (2014). The effect of plant regulators on the concentration of carotenoids and phenolic compounds in foliage of coriander. *LWT-Food Science and Technology*, 56(1), 101-110.
46. Eleiwa, M. E., Bafeel, S. O. & Ibrahim, S. A. (2011). Influence of brassinosteroids on wheat plant (*Triticum aestivum* L.) production under salinity stress conditions. I-Growth parameters and photosynthetic pigments. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(5), 58-65.
47. Gill, M. B., Cai, K., Zhang, G. & Zeng, F. (2017). Brassinolide alleviates the drought-induced adverse effects in barley by modulation of enzymatic antioxidants and ultrastructure. *Plant Growth Regulation*, 82(3), 447-455.
48. Gill, S. S. & Tuteja, N. (2010). Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 48(12), 909-930.
49. Grasten, S. M., Juntunen, K. S., Poutanen, K. S., Gylling, H. K., Miettinen, T. A. & Mykkanen, H. M. (2000). Rye bread improves bowel function and decreases the concentrations of some compounds that are putative colon cancer risk markers in middle-aged women and men. *The Journal of Nutrition*, 130(9), 2215-2221.
50. Grewal, H. S. (2010). Water uptake, water use efficiency, plant growth and ionic balance of wheat, barley, canola and chickpea plants on a sodic vertosol with variable subsoil NaCl salinity. *Agricultural Water Management*, 97, 148-156.
51. Grieve, C. M. & Grattan, S. R. (1983). Rapid assay for determination of water soluble quaternary ammonium compounds. *Plant and Soil*, 70, 303-307.
52. Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Alam, M. M., Roychowdhury, R. & Fujita, M. (2013). Physiological, biochemical, and molecular mechanisms of heat stress tolerance in plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 14(5), 9643-9684.
53. Hayat, S., and Ahmad, A. (2010). *Brassinosteroids: a class of plant hormone*. Springer Science and Business Media.
54. He, Y. & Zhu, Z. J. (2008). Exogenous salicylic acid alleviates NaCl toxicity and increases antioxidative enzyme activity in *Lycopersicon esculentum*. *Biologia Plantarum*, 52, 792-795.

55. Hernandez, I., Alegre, L. & Munné-Bosch, S. (2006). Enhanced oxidation of flavan-3-ols and proanthocyanidin accumulation in water-stressed tea plants. *Phytochemistry*, 67(11), 1120-1126.

56. Isaksson, H., Fredriksson, H., Andersson, R., Olsson, J. & Åman, P. (2009). Effect of rye bread breakfasts on subjective hunger and satiety: a randomized controlled trial. *Nutrition Journal*, 8, 1-8.

57. Jaakola, L., Määttä-Riihinen, K., Kärenlampi, S. & Hohtola, A. (2004). Activation of flavonoid biosynthesis by solar radiation in bilberry (*Vaccinium myrtillus* L.) leaves. *Planta*, 218, 721-728.

58. Jaleel, C. A., Gopi, R., Sankar, B., Gomathinayagam, M. & Panneerselvam, R. (2008). Differential responses in water use efficiency in two varieties of *Catharanthus roseus* under drought stress. *Comptes Rendus Biologies*, 331(1), 42-47.

59. Jiroutova, P., Oklestkova, J. & Strnad, M. (2018). Crosstalk between brassinosteroids and ethylene during plant growth and under abiotic stress conditions. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(10), 3283.

60. Jubany-Mari, T., Munné-Bosch, S. & Alegre, L. (2010). Redox regulation of water stress responses in field-grown plants. Role of hydrogen peroxide and ascorbate. *Plant Physiology and Biochemistry*, 48(5), 351-358.

61. Kagale, S., Divi, U. K., Krochko, J. E., Keller, W. A. & Krishna, P. (2007). Brassinosteroid confers tolerance in Arabidopsis thaliana and Brassica napus to a range of abiotic stresses. *Planta*, 225, 353-364.

62. Kovinich, N., Kayanja, G., Chanoca, A., Otegui, M. S. & Grotewold, E. (2015). Abiotic stresses induce different localizations of anthocyanins in *Arabidopsis*. *Plant Signaling and Behavior*, 10(7), e1027850.

63. Koyro, H. W. (2006). Effect of salinity on growth, photosynthesis, water relations and solute composition of potential cash crop halophyte (*Plantago coronopus* L.). *Environ Journal of Experimental Botany*, 56, 136-149.

64. Krishna, P. (2003). Brassinosteroid-mediated stress responses. *Journal of Plant Growth Regulation*, 22(4), 289-297.

65. Lee, Y. P., Kim, S. H., Bang, J. W., Lee, H. S., Kwak, S. S. & Kwon, S. Y. (2007). Enhanced tolerance to oxidative stress in transgenic tobacco plants expressing three antioxidant enzymes in chloroplasts. *Plant Cell Reports*, 26(5), 591-598.

66. Leinonen, K. S., Poutanen, K. S. & Mykkanen, H. M. (2000). Rye bread decreases serum total and LDL cholesterol in men with moderately elevated serum cholesterol. *The Journal of Nutrition*, 130(2), 164-170.

67. Li, Y., Ye, W., Wang, M. & Yan, X. (2009). Climate change and drought: a risk assessment of crop-yield impacts. *Climate Research*, 39(1), 31-46.

68. Liu, H., Wang, X., Wang, D., Zou, Z. & Liang, Z. (2011). Effect of drought stress on growth and accumulation of active constituents in *Salvia miltiorrhiza* Bunge. *Industrial Crops and Products*, 33(1), 84-88.

69. Mensah, J. K., Obadoni, B. O., Eruotor, P. G. & Onome-Irieguna, F. (2006). Simulated flooding and drought effects on germination, growth, and yield parameters of sesame (S*esamum indicum* L.). *African Journal of Biotechnology*, 5(13), 1249-1253.

70. Michele, A. T, & Douglas, A. F. (2009). The effects of clipping and soil moisture on leaf and root morphology and root respiration in two temperate and two tropical grasses. *Plant Ecology*, 200, 205-215.

71. Mohammadi, M., Tavakoli, A., Pouryousef, M. & Mohseni Fard, E. (2020). Study the effect of 24-epibrassinolide application on the Cu/Zn-SOD expression and tolerance to drought stress in common bean. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 26, 459-474.

72. Moharramnejad, S., Sofalian, O., Valizadeh, M., Asgari, A. & Shiri, M. R. (2016). Response of antioxidant defense system to osmotic stress in maize seedling. *Fresenius Environmental Bulletin*, 25, 805-811.

73. Morello, J. R., Romero, M. P., Ramo, T. & Motilva, M. J. (2005). Evaluation of L-phenylalanine ammonia-lyase activity and phenolic profile in olive drupe (*Olea europaea* L.) from fruit setting period to harvesting time. *Plant Science*, 168(1), 65-72.

74. Noreen, S. & Ashraf, M. (2008). Alleviation of adverse effects of salt stress on sunflower (*Helianthus annuus* L.) by exogenous application of salicylic acid: growth and photosynthesis. *Pakistan Journal of Botany*, 40(4), 1657-1663.

75. Ozdemir, F., Bor, M., Demiral, T. & Türkan, İ. (2004). Effects of 24-epibrassinolide on seed germination, seedling growth, lipid peroxidation, proline content and antioxidative system of rice (*Oryza sativa* L.) under salinity stress. *Plant Growth Regulation*, 42, 203-211.

76. Parra-Lobato, M. C., Fernandez-Garcia, N., Olmos, E., Alvarez-Tinaut, M. C. & Gómez-Jiménez, M. C. (2009). Methyl jasmonate-induced antioxidant defence in root apoplast from sunflower seedlings. *Environmental and Experimental Botany*, 66(1), 9-17.

77. Prins, C. L., Vieira, I. J. & Freitas, S. P. (2010). Growth regulators and essential oil production. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 22, 91-102.

78. Quettier-Deleu, C., Gressier, B., Vasseur, J., Dine, T., Brunet, C., Luyckx, M., Cayin, J., Bailleul, F. & Trotin, F. (2000). Phenolic compounds and antioxidant activities of buckwheat (*Fagopyrum esculentum Moench*) hulls and flour. *Journal of Ethnopharmacology*, 72(1-2), 35-42.

79. Rattan, A., Kapoor, D., Kapoor, N., Bhardwaj, R. & Sharma, A. (2020). Brassinosteroids regulate functional components of antioxidative defense system in salt stressed maize seedlings. *Journal of Plant Growth Regulation*, 39, 1465-1475.

80. Rezaei, H., Saeedi-Sar, S., Ebadi1, M. & Abbaspoor, H. (2018). The effect of methyl jasmonate and 24-epi-brassinosteroids foliar application on protein, sugars, anthocyanin, phenol and flavonoid content of black mustard (*Brassica nigra* L.) Under salinity conditions. *Journal of Plant Process and Function*, 7(25), 53-62.

81. Ruiz, J. M. & Romero, L. (2001). Bioactivity of the phenolic compounds in higher plants. *Studies in Natural Products Chemistry*, 25, 651-681.

82. Schilling, G., Schiller, C. & Otto, S. (1991). Influence of brassinosteroids on organ relations and enzyme activities of sugar-beet plants. In: "Brassinosteroids. Chemistry,

Bioactivity, and Applications. ACS Symposium Series" (H. G. Cutler, T. Yokota, and G. Adam, Eds), Vol. 474, pp.

83. Sheteiwy, M. S., Gong, D., Gao, Y., Pan, R., Hu, J. & Guan, Y. (2018). Priming with methyl jasmonate alleviates polyethylene glycol-induced osmotic stress in rice seeds by regulating the seed metabolic profile. *Environmental and Experimental Botany*, 153, 236-248.
84. Shitole, S. M. & Dhumal, K. N. (2012). Effect of water stress by polyethylene glycol 6000 and sodium chloride on seed germination and seedling growth of Cassia angustifolia. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 3(2), 528-531.
85. Song, Y. L., Dong, Y. J., Tian, X. Y., Kong, J., Bai, X. Y., Xu, L. L. & He, Z. L. (2016). Role of foliar application of 24-epibrassinolide in response of peanut seedlings to iron deficiency. *Biologia Plantarum*, 60, 329-342.
86. Steber, C. M. & McCourt, P. (2001). A role for brassinosteroids in germination in Arabidopsis. *Plant Physiology*, 125(2), 763-769.
87. Syvacy, A. & Sokmen, M. (2004). Seasonal changes in antioxidant activity, total phenolic and anthocyanin constituent of the stems of two Morus species (*Morus alba* L. and *Morus nigra* L.). *Plant Growth Regulation*, 44, 251-256.
88. Szekeres, M., Németh, K., Koncz-Kálmán, Z., Mathur, J., Kauschmann, A., Altmann, T., Redei, G. P., Nagy, F., Schell, J. & Koncz, C. (1996). Brassinosteroids rescue the deficiency of CYP90, a cytochrome P450, controlling cell elongation and de-etiolation in Arabidopsis. *Cell*, 85(2), 171-182.
89. Tale-Ahmad, S. & Haddad, R. (2011). Study of silicon effects on antioxidant enzyme activities and osmotic adjustment of wheat under drought stress. *Czech Journal of Genetics and Plant Breeding*, 47, 17-27.
90. Vardhini B. V. & Rao S. S. R. (2003). Amelioration of osmotic stress by brassinosteroids on seed germination and seedling growth of three varieties of sorghum. *Plant Growth Regulation*, 41, 25-31.
91. Wasson, A. P., Richards, R. A., Chatrath, R., Misra, S. C., Sai Prasad, S. V., Rebetzke, G. J., Kirkegaard, J. A., Christopher, J. & Watt, M. (2012). Traits and selection strategies to improve root systems and water uptake in water-limited wheat crops. *Journal of Experimental Botany*, 63(9), 3485-3498.
92. Weidner, S., Karolak, M., Karamac, M., Kosinska, A. & Amarowicz, R. (2009). Phenolic compounds and properties of antioxidants in grapevine roots (*Vitis vinifera* L.) under drought stress followed by recovery. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, 78(2), 97-103.
93. Xu, Z., Zhou, G. & Shimizu, H. (2010). Plant responses to drought and rewatering. *Plant Signaling and Behavior*, 5(6), 649-654.
94. Yang, W. J., Rich, P. J., Axtell, J. D., Wood, K. V., Bonham, C. C., Ejeta, G., Mickelbart, M. V. & Rhodes, D. (2003). Genotypic variation for glycinebetaine in sorghum. *Crop Science*, 43(1), 162-169.
95. Yang, X. & Lu, C. (2005). Photosynthesis is improved by exogenous glycinebetaine in salt-stressed maize plants. *Physiologia Plantarum*, 124(3), 343-352.
96. Zhang, K. M., Yu, H. J., Shi, K., Zhou, Y. H., Yu, J. Q. & Xia, X. J. (2010). Photoprotective roles of anthocyanins in *Begonia semperflorens*. *Plant Science*, 179(3), 202-208.
97. Zhang, M., Zhai, Z., Tian, X., Duan, L. & Li, Z. (2008). Brassinolide alleviated the adverse effect of water deficits on photosynthesis and the antioxidant of soybean (*Glycine max* L.). *Plant Growth Regulation*, 56, 257-264.
98. Zhu, Y., Conklin, D. R., Chen, H., Wang, L. & Sang, S. (2011). 5-Alk (en) ylresorcinols as the major active components in wheat bran inhibit human colon cancer cell growth. *Bioorganic and medicinal Chemistry*, 19(13), 3973-3982.
99. Zielinski, H., Ceglińska, A. & Michalska, A. (2007). Antioxidant contents and properties as quality indices of rye cultivars. *Food Chemistry*, 104(3), 980-988.

مقاله پژوهشی، صفحات ۱۱۴-۹۸

Alleviation of Drought Stress Effects in Rye (*Secale cereale* L.) Seedlings by 24-Epibrassinolide Hormone Foliar Application

Hatami S.[1], Salehilisar S.Y.[1], Rahmani F.[2], Porakbar L.[2], and Samadani B.[3]

[1] Dept. of Plant, Cell and Molecular Biology, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, I.R. of Iran

[2] Dept. of Biology, Faculty of Science, University of Urmia, Urmia, I.R. of Iran

[3] Agriculture and Natural Resource Research Organization of Iran, Plant Protection Institute, Tehran, I.R. of Iran

Abstract

Drought stress is one of the most critical environmental stresses affecting plant growth and yields worldwide. The use of plant growth regulators such as brassinosteroids can be effective in improving the resistance of plants to environmental stresses. In order to study the effect of 24-Epibrasinolide hormone on the morphological and physiological characteristics of three trials of rye plants under drought stress conditions, a factorial experiment was conducted based on a completely randomized design with three replications in the Faculty of Sciences of Urmia University in 2019. The investigated factors include 3 trials of winter Rye plant (Lonkord Variaty provided from seeds and plant improvement institute, farmer usage seeds and a population of rye gathered as weed from different farms), 24-Epibrasinolide hormone in two levels (no foliar application as control and foliar application of 10^{-8} M) and drought stress in four levels (no-drought stress as control, 6%, 12%, and 18% by polyethylene glycol (PEG6000)) was done. Results showed that different levels of drought stress decreased root and shoot dry weight, root and shoot length, seed vigor index, and germination percentage, while the content of flavonoids in roots and shoots decreased. In contrast, the content of total phenols, glycine betaine, and anthocyanins increased in roots and shoots. On the other hand, the foliar application of the 24-epibrasinolide hormone improved all studied traits, except for total phenol content in both root and shoot. The results of this research attribute the protective role of the 24-Epibrasinolide hormone in reducing the harmful effects of drought stress to the improvement of non-enzymatic antioxidant activity, such as the accumulation of glycine betaine, total phenol, and anthocyanins. Based on these results, it seems that the foliar application of 24-Epibrasinolide hormone can be recommended for increasing the productivity and resistance of rye to drought stress in the fields.

Keywords: Glycine betaine, Non-enzymatic antioxidants, Phenolic compounds, Plant growth regulators, Polyethylene glycol,