Iranian Journal of Field Crop Science
Vol 53, No 2, Summer 2022 (127-141)
DOI: 10.22059/IJFCS.2021. 322568.654822

علوم گیاهان زراعی ایران
دورهٔ ۵۳، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۴۰۱ (ص۱۴۱-۱۲۷)

Effect of salicylic acid and brassinosteroid on physiological response and grain and oil yields of coriander (*Coriandrum sativum* L.) under water deficit

Mehdi Panahyan.Kivi
Deparrtment of Agronomy, Payame Noor University, Tehran, Iran.

(Received: May 1, 2021 - Accepted: June 8, 2021)

ABSTRACT

A field experiment was carried out as a split-plot based on an RCB design with three replications in 2020. Treatments were four levels of water supply (irrigation after 70, 100, 130 and 160 mm evaporation from class A pan) as main plots and three levels of foliar application (control (water spray), foliar application of 1 mmol salicylic acid (SA) and 1 µmol brassinosteroid (BRs) as sub plots. Water deficit stress resulted in 20.6% and 21.6% decrease in chlorophylls a and b content, and 62.9% increase in leaf carotenoids, but leaf proline content increased under water stress. The mean chlorophyll a content increased (11.4%) with SA application. Decreasing water availability increased the activity of catalase, peroxidase, and ascorbate peroxidase and polyphenol oxidase by 3.2, 1.7, 1.9 and 3.1 times, respectively. The activity of these enzymes increased by 14.4, 16.6, 8.8 and 6.8% respectively with SA application and increased by 17.6, 12.2, 8.8 and 19.9% respectively by BRs application. Grain yield and oil percentage and yield of coriander seed decreased under drought stress (75.1% and 15.4%, respectively), which resulted in a decrease in oil yield (78.9%). Oil yield was increased by SA and BRs (22.4 and 11.2% respectively). SA foliar application showed a significant advantage in comparison to BRs in the most of the traits, especially grain yield. Therefore, the application of SA can be introduced as a suitable treatment to improve coriander grain and oil yield.

Keywords: Antioxidant enzymes, coriander, drought stress, epibrassinolide, growth regulators.

اثر سالیسیلیک اسید و براسینواستروئید بر واکنش‌های فیزیولوژیکی، عملکرد دانه و روغن گشنیز (*Coriandrum sativum* L.) تحت شرایط کم‌آبی

مهدی پناهیان کیوی
استادیار گروه کشاورزی دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۲/۱۱ - تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۳/۱۸)

چکیده

آزمایش مزرعه‌ای به‌صورت اسپلیت‌پلات و بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال ۱۳۹۹ اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل چهار سطح آبیاری (آبیاری بعد از ۷۰، ۱۰۰، ۱۳۰ و ۱۶۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک کلاس A) در کرت‌های اصلی و سه سطح محلول‌پاشی شامل شاهد (آب‌پاشی)، محلول‌پاشی با سالیسیلیک اسید (یک میلی‌مولار) و براسینواستروئید (یک میکرومولار) در کرت‌های فرعی بودند. تنش کم‌آبی به‌ترتیب به افت ۲۰/۶ و ۲۱/۶ درصدی محتوای کلروفیل‌های a و b و افزایش ۶۲/۹ درصدی کاروتنوئید برگ منجر شد، اما محتوای پرولین برگ تحت این شرایط افزایش یافت. محتوای کلروفیل a به‌طور معنی‌داری با کاربرد سالیسیلیک اسید افزایش (۱۱/۴ درصد) پیدا کرد. تنش کم‌آبی منجر به افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان کاتالاز، پراکسیداز، آسکوربات پراکسیداز و پلی‌فنل اکسیداز به‌ترتیب به میزان ۳/۲، ۱/۷، ۱/۹ و ۳/۱ برابر شاهد شد. کاربرد سالیسیلیک اسید، فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز، آسکوربات پراکسیداز و پلی‌فنل اکسیداز را به‌ترتیب ۱۴/۴، ۱۶/۶، ۸/۸ و ۶/۸ درصد و کاربرد براسینواستروئید فعالیت این آنزیم‌ها را به‌ترتیب ۱۷/۶، ۱۲/۲، ۸/۸ و ۱۹/۹ درصد افزایش داد. عملکرد دانه و درصد روغن دانه گشنیز تحت تنش خشکی کاهش یافتند (به‌ترتیب ۷۵/۱ و ۱۵/۴ درصد) که نتیجه آن، افت عملکرد روغن تحت این شرایط بود (۷۸/۹ درصد). عملکرد روغن با محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید و براسینواستروئید به‌ترتیب ۲۲/۴ و ۱۱/۲ درصد افزایش یافت. محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید در اغلب صفات و به‌ویژه محصول دانه مزیت معنی‌داری نسبت به براسینواستروئید نشان داد. بنابراین، کاربرد سالیسیلیک اسید را می‌توان به‌عنوان تیمار مناسب برای بهبود تولید دانه و روغن گشنیز معرفی نمود.

واژه‌های کلیدی: اپی‌براسینولید، آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، تنش خشکی، تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی، گشنیز.

* Corresponding author E-mail: panahyan@pnu.ac.ir

مقدمه

رشد و عملکرد گیاه تحت تأثیر تنش‌های زیستی و غیر زیستی قرار می‌گیرد. کمبود آب از مهم‌ترین تنش‌های غیر زیستی است که اثرات منفی بر رشد و عملکرد گیاهان دارد و تولید محصول در ۲۵ درصد از اراضی زراعی جهان را محدود کرده است (FAO, 2019). اغلب اراضی ایران در مناطق خشک و نیمه‌خشک قرار دارد (Azarakhshi *et al*., 2013). تنش کم‌آبی زمانی در گیاه رخ می‌دهد که مقدار تعرق از سطح برگ‌ها از ظرفیت ریشه برای جذب آب از خاک بیشتر شود و شرایط آب و هوایی موجب اتلاف مداوم آب به دلیل تعرق و تبخیر شود که نتیجه آن، رقابت بین گیاهان برای جذب آب از خاک است (Jaleel *et al*., 2009).

خشکی به‌عنوان یک تنش چندبعدی، اثرات گوناگونی بر گیاهان دارد و اغلب ویژگی‌های مورفولوژیکی و فرایندهای فیزیولوژیکی مرتبط با رشد و تولید عملکرد گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. واکنش گیاهان به تنش خشکی به‌شدت و مدت تنش، گونه گیاهی و مرحله رشد بستگی دارد (Wang *et al*., 2016). تحت شرایط تنش کم‌آبی، توسعه سلول محدود شده و یا متوقف می‌شود و درنتیجه رشد گیاه به تأخیر می‌افتد. در شرایط تنش خشکی طولانی‌مدت، بسیاری از گیاهان آب خود را از دست داده و از بین می‌روند (Lisar *et al*., 2012). تنش خشکی به بسته شدن روزنه‌ها، کاهش شدت تعرق، افت پتانسیل آب بافت‌های گیاه، کاهش سرعت فتوسنتز و مهار رشد، سنتز پروتئین‌ها و mRNA جدید، تشکیل ترکیبات مهارکننده رادیکال‌های آزاد (مانند آسکوربات، گلوتاتیون و آلفا توکوفرول) و تجمع املاح، منجر می‌شود و بیان ژن‌های ویژه تنش را القا می‌کند (Lisar *et al*., 2012). کاهش معنی‌دار صفات مختلف رشدی مانند تعداد برگ و وزن تر و خشک بوته تحت تنش کمبود آب در گیاهان دارویی گشنیز (Nourzad *et al*., 2014) و شوید (Setayesh-mehr & Ganjali, 2013) گزارش‌شده است.

افزایش مقاومت گیاهان به تنش خشکی از روش‌های مختلف مانند به‌نژادی و کاربرد تنظیم‌کننده‌های رشد قابل انجام است. در مقایسه با شیوه‌های به‌نژادی که اغلب بلندمدت و هزینه‌بر هستند، استفاده از مواد شیمیایی مانند سالیسیلیک اسید و براسینواستروئید آسان و ارزان‌تر می‌باشد (Abaspour & Rezaei, 2014).

سالیسیلیک اسید یا اورتوهیدروکسی بنزوئیک اسید، یک ترکیب فنلی گیاهی و یک تنظیم‌کننده هورمونی است و در واکنش‌های دفاعی برای مقابله با اثرات منفی تنش‌های زیستی و محیطی نقش دارد. کاربرد سالیسیلات خارجی موجب افزایش مقاومت گیاهان نسبت به تنش خشکی و شوری می‌شود (Tari *et al*., 2002). سالیسیلیک اسید موجب افزایش صفات رشدی مانند وزن خشک اندام هوایی و تعداد برگ در گیاهان دارویی مرزنجوش و ریحان تحت تنش خشکی شده است (El-Lateef-Gharib, 2006). سالیسیلات، اثرات کلیدی در گیاهان متأثر از تنش ازجمله اثر برجذب عناصر معدنی، پایداری غشا و روابط آبی، عملکرد روزنه‌ها و بازدارندگی سنتز اتیلن و بهبود رشد دارد (Rahbarian & Salehi-Sardoei, 2014). سالیسیلیک اسید بسیاری از فرایندهای فیزیولوژیکی و رشد گیاهان را تنظیم و سبب سازگاری گیاهان به تنش‌های محیطی می‌شود. در مطالعه‌ای، محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید با افزایش کلروفیل‌های a و b در بادرشبو، موجب افزایش مقاومت به خشکی شده است (Abaspour & Rezaei, 2014).

براسینواستروئیدها اولین بار از دانه گرده کلزا استخراج و به‌عنوان ششمین گروه از تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی در نظر گرفته شدند (Krishna *et al*., 2017). این تنظیم‌کننده‌های رشد موجب تحریک رشد و تقسیم سلولی می‌شوند و بر خصوصیات الکتریکی، نفوذپذیری غشاء و پایداری و فعالیت آنزیم‌های غشاء تأثیر دارند. تاکنون ۵۹ براسینواستروئید از گیاهان مختلف استخراج و ساختار و عملکرد آن‌ها شناسایی شده است (Yin *et al*., 2019). براسینواستروئیدها تحمل گیاهان به محدوده وسیعی از تنش‌های محیطی

را افزایش می‌دهند. این افزایش اغلب به‌دلیل تولید و رونویسی ژن‌های ضد تنش مانند پروتئین‌های شوک گرمایی به‌منظور بالا بردن تحمل به تنش در گیاهان تیمار شده با براسینواستروئید بوده است (Ahammed *et al*., 2014). باوجود این‌که پژوهش‌های بسیاری در زمینه تأثیر مثبت براسینواستروئید در بهبود تحمل گیاهان به تنش‌های شوری و دمای بالا انجام شده‌اند، ولی تحقیقات محدودی در زمینه اثربخشی کاربرد براسینواستروئید در کاهش اثرات تنش خشکی در گیاهان زراعی انجام شده است (Zafari *et al*., 2017).

گشنیز با نام علمی *Coriandrum sativum* L. گیاهی علفی و یک‌ساله از تیره چتریان و با دوره رشد ۱۰۰ تا ۱۲۰ روز است که در بسیاری از کشورها به‌عنوان گیاهی بهاره و در کشورهای حاشیه مدیترانه و جنوب شرقی آسیا به‌صورت گیاهی پائیزه کشت می‌شود. این گیاه گرمادوست است و در انواع خاک‌ها می‌روید. سرشاخه‌های گشنیز به‌صورت تازه در سالاد و سوپ و دانه آن در صنایع غذایی و به‌عنوان چاشنی مصرف می‌شود. اسانس گشنیز حاوی ۵۰ درصد لینالول[1] است و در صنایع دارویی، آرایشی و بهداشتی به‌کار گرفته می‌شود و روغن دانه آن در صنایع غذایی و دارویی کاربرد دارد (Omidbeigi, 2000). سابقه کشت این گیاه در ایران بسیار طولانی است و سطح زیر کشت آن دو هزار هکتار با تولید چهار هزار تن محصول است. در حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد تولید سالیانه محصول گشنیز در ایران به استان همدان تعلق دارد که در اغلب اراضی تولید آن، مشکل دسترسی به آب وجود دارد (Sharififar *et al*., 2017).

با توجه به مشکلات کم‌آبی در کشور و کاربرد گسترده گشنیز در صنایع دارویی، آرایشی، بهداشتی و غذایی (Yeganehpoor *et al*., 2017)، این تحقیق به‌منظور بررسی اثرات محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید و براسینواستروئید بر برخی از صفات فیزیولوژیکی مرتبط با تحمل به تنش خشکی، عملکرد دانه و نیز تولید روغن، به اجرا درآمد.

مواد و روش‌ها

مشخصات محل اجرای آزمایش مزرعه‌ای

این پژوهش در سال ۱۳۹۹ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه پیام نور اردبیل با ارتفاع ۱۳۵۰ متر از سطح دریای آزاد اجرا شد. این منطقه دارای زمستان‌های خیلی سرد و بهار و تابستان‌های معتدل است. میانگین حداقل و حداکثر دمای سالانه در طی یک دوره ۱۵ ساله به‌ترتیب ۷/۹ و ۲۰/۵ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارش سالیانه حدود ۴۰۰ میلی‌متر می‌باشد (Azarakhshi *et al*., 2013).

خصوصیات خاک مزرعه

به‌منظور بررسی وضعیت خاک قطعه زمین مورد نظر در مزرعه، نمونه خاکی از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری تهیه شد که نتایج حاصل از تجزیه خاک در جدول ۱ درج شده است.

عملیات مزرعه‌ای

شخم زمین محل اجرای آزمایش در پاییز سال ۱۳۹۸ صورت گرفت و عملیات تکمیلی تهیه زمین (دیسک) و کرت‌بندی نیز در بهار سال ۱۳۹۹ انجام شد. هر واحد آزمایشی دارای هشت ردیف کاشت سه متری بود. فاصله بین ردیف‌های کاشت ۲۵ سانتی‌متر و فاصله بوته‌ها روی ردیف ۱۰ سانتی‌متر (تراکم ۴۰ بوته در مترمربع) و فاصله دو کرت مجاور از هم یک متر و فاصله تکرارها از یکدیگر ۱/۵ متر در نظر گرفته شد. دو ردیف کناری و ۵۰ سانتی‌متر از ابتدا و انتهای هر کرت به‌عنوان حاشیه در نظر گرفته شد. بذر گشنیز مورد استفاده در این تحقیق از بخش گیاهان دارویی مرکز تحقیقات کشاورزی استان کرمانشاه تهیه شد که توده بومی و مورد کشت منطقه بود. بذرها در تاریخ ۱۴ اردیبهشت‌ماه در شیارهایی به عمق دو تا سه سانتی‌متر کشت شدند.

آزمایش به‌صورت کرت‌های خردشده و بر پایه طرح بلوک کامل تصادفی با سه تکرار به اجرا درآمد. فواصل آبیاری (I_1، I_2، I_3 و I_4: به‌ترتیب آبیاری پس از ۷۰، ۱۰۰، ۱۳۰ و ۱۶۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک کلاس A) به‌عنوان عامل اصلی (سطح آبیاری I_1 به‌عنوان آبیاری مطلوب (بدون تنش کمبود آب) و سایر سطوح

[1] Linalool

آبیاری به‌عنوان تیمارهای تنش کمبود آب در نظر گرفته شدند (Rahimi & Kafi, 2009) و محلول‌پاشی با سالیسیلیک اسید یک میلی‌مولار (Ghassemi-Golezani *et al*. 2018) و براسینواستروئید یک میکرومولار (Hemmati *et al*. 2018) و شاهد (محلول-پاشی با آب) به‌عنوان عامل فرعی در نظر گرفته شدند. پس از استقرار کامل گیاهچه‌ها (مرحله پنج برگی گیاه)، بوته‌ها تنک شدند و پس از آن، آبیاری‌ها بر اساس تیمارهای مورد نظر و میزان تبخیر از تشتک صورت گرفت. محلول‌پاشی در دو نوبت (پنج برگی و گل‌دهی کامل به‌منظور اطمینان از اثربخشی کامل تیمار محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید و براسینواستروئید (Ghassemi-Golezani *et al*. 2018)) و هر بار صبح زود و قبل از طلوع آفتاب و در زمان-هایی که وزش باد وجود نداشت، با سم‌پاش دستی انجام گرفت. وجین علف‌های‌هرز همه کرت‌های آزمایشی به‌صورت دستی و در چندین نوبت انجام شد. برداشت گشنیز در نیمه دوم مردادماه سال ۱۳۹۹ (۱۹ مردادماه)، زمانی که چترهای اصلی کاملاً رسیده بودند و رنگ آن‌ها به زرد تغییریافته بود، صورت گرفت.

جدول ۱- نتایج تجزیه فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه محل انجام آزمایش

Table 1. Physiochemical analysis of the experiment site soil

Fe (mg/kg)	Zn (mg/kg)	K (mg/kg)	P (mg/kg)	N (%)	OC (%)	EC (dS/m)	Soil Texture	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	pH	Depth (cm)
7.9	0.88	294	17.1	0.06	0.83	1.21	Sandy loam	62	24	14	7.65	0-30

صفات موردبررسی

پرولین

برای استخراج پرولین برگ از روش Bates *et al*. (1973) استفاده شد. غلظت پرولین در هر نمونه بر اساس جذب و غلظت‌های معین موجود در منحنی استاندارد بر اساس میلی‌گرم در گرم وزن تر محاسبه شد.

کلروفیل‌های a و b و کاروتنوئید

برای اندازه‌گیری کلروفیل‌های a و b و کاروتنوئید، مقدار جذب عصاره‌های استخراجی در طول‌موج‌های ۶۶۳، ۶۴۶ و ۴۷۰ نانومتر (A) توسط اسپکتروفتومتر (مدل SPEKOL 1500) قرائت شد و در نهایت با استفاده از فرمول‌های زیر، محتوای کلروفیل‌های a و b و کاروتنوئیدها (مجموع گزانتوفیل و کاروتن‌ها) محاسبه شد (Lichtenthaler & Buschmann, 2001).

$Ch_a = 12.21\ (A_{663}) - 2.81\ (A_{646})$

$Ch_b = 20.13\ (A_{646}) - 5.03\ (A_{663})$

$Car_{(x+c)} = [1000\ (A_{470}) - 3.27\ (Ch_a) - 104\ (Ch_b)] / 229$

سنجش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان برگ

یک گرم از بافت برگی در هاون چینی با نیتروژن مایع پودر و سپس با ۱۰ میلی‌لیتر بافر فسفات سدیم با غلظت ۵۰ میلی‌مولار و pH برابر ۶/۸ استخراج شد و مخلوط حاصل به مدت ۲۰ دقیقه با ۱۲۰۰۰ دور در دقیقه در دمای چهار درجه سانتی‌گراد سانتریفیوژ شد. از رو شناور حاصل برای سنجش آنزیم‌ها استفاده شد (Bradford, 1976).

کاتالاز

محلول واکنش حاوی بافر فسفات ۵۰ میلی‌مولار (pH=۷)، H_2O_2 ۱۰ میلی‌مولار و ۱۰۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی بود. تجزیه آب اکسیژنه با کاهش جذب طی مدت ۷۰ ثانیه در طول‌موج ۲۴۰ نانومتر پیگیری و به ازای هر میلی‌گرم پروتئین در عصاره آنزیمی بیان شد (Chance & Maechly, 1995).

پراکسیداز

فعالیت پراکسیداز با استفاده از آزمون گایاکول سنجش شد. تغییرات جذب در طول‌موج ۴۷۰ نانومتر به مدت ۹۰ ثانیه توسط دستگاه اسپکتروفتومتر ثبت شد و واحد فعالیت آنزیم با استفاده از ضریب خاموشی تتراگایاکول (۲۶/۶ $mM^{-1}cm^{-1}$) برحسب واحد mmol tetra guaicol mg^{-1} protein min^{-1} محاسبه شد (Chance & Maechly, 1995).

آسکوربات پراکسیداز

فعالیت آنزیم با استفاده از ضریب خاموشی آسکوربیک اسید (۲/۸ $mM^{-1}cm^{-1}$) برحسب mmol ascorbic

acid mg^{-1} protein min^{-1} محاسبه شد (Nakano & Asada, 1981).

پلی‌فنل اکسیداز

برای سنجش فعالیت آنزیم پلی‌فنل اکسیداز از روش Kar & Mishra (1976) استفاده شد.

قندهای محلول

میزان قندهای محلول گیاه با استفاده از روش فنل سولفوریک اسید (Kochert, 1978) اندازه‌گیری شد.

آنتوسیانین

برای سنجش آنتوسیانین از روش Wagner (1979) استفاده شد.

عملکرد دانه

برای تعیین عملکرد دانه در واحد سطح، بوته‌های موجود در یک متر مربع از خطوط میانی هر کرت به روش دستی، کف بر و برداشت شدند و پس از خشک شدن در سایه و هوای آزاد، در گونی‌هایی کوبیده شدند تا دانه آن‌ها جدا شود. درصد رطوبت دانه‌ها در زمان اندازه‌گیری در حدود ۱۴ درصد بود.

درصد و عملکرد روغن

تعیین درصد روغن گشنیز با روش انجمن AOAC (1990)[1] و با استفاده از دستگاه سوکسله انجام شد. عملکرد روغن نیز از حاصل‌ضرب درصد روغن در عملکرد دانه به دست آمد.

تجزیه‌های آماری

پیش از تجزیه واریانس، آزمون نرمال بودن و یکنواختی واریانس خطای داده‌ها با آزمون کولموگروف - اسمیرنوف انجام گرفت (Palliotti *et al*., 2011) تا در صورت نیاز، تبدیل داده مناسب صورت گیرد. از نرم‌افزار MSTAT-C و SPSS Ver.۲۱ برای انجام تجزیه‌های آماری استفاده شد. میانگین داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار MSTAT-C و بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال خطای پنج درصد مقایسه شد.

نتایج و بحث

غلظت پرولین برگ

بر اساس نتایج جدول ۲، اثر سطوح آبیاری و محلول‌پاشی و نیز اثر متقابل آبیاری × محلول‌پاشی بر غلظت پرولین برگ گشنیز معنی‌دار بودند. تنش متوسط (I_3) و شدید خشکی (I_4) موجب افزایش معنی‌دار محتوای پرولین برگ شد. بیشترین محتوای پرولین برگ از سطح آبیاری I_4 و تیمار محلول‌پاشی با سالیسیلیک اسید به‌دست آمد. محلول‌پاشی با سالیسیلیک اسید و براسینواستروئید در تیمار آبیاری مطلوب (I_1) و تنش ملایم خشکی (I_2) اثری بر محتوای پرولین برگ نداشت، ولی اثر این تنظیم‌کننده‌های رشد و به‌ویژه سالیسیلیک اسید در افزایش محتوای پرولین برگ در تیمارهای آبیاری I_3 و I_4 معنی‌دار بود (شکل ۱).

Wang *et al* (2016) عنوان کردند که تجمع پرولین، پاسخ متابولیکی گیاهان عالی به کمبود آب است. غلظت‌های بالای پرولین تحت تنش خشکی برای گیاهان مفید هست، زیرا پرولین در پتانسیل اسمزی و در نتیجه تنظیم اسمزی برگ شرکت می‌کند. افزایش تجمع پرولین تحت تنش خشکی، ناشی از افزایش فعالیت آنزیم پرولین‌سنتتاز یا کاهش اکسیداسیون گلوتامات و یا کاهش دخالت آن در سنتز پروتئین است (Seki *et al*., 2007). در ریحان نیز با افزایش غلظت اسید سالیسیلیک، میزان پرولین افزایش معنی‌داری نسبت به شاهد داشته است (Ramrodi & Khamr, 2013). Yeganehpoor *et al* (2017) نیز گزارش کردند که کاربرد سالیسیلیک اسید موجب افزایش محتوای پرولین برگ گشنیز تحت شرایط آبیاری مطلوب و محدود شد که این واکنش فیزیولوژیکی را یکی از مکانیزم‌های افزایش مقاومت به تنش خشکی در این گیاه عنوان کردند. Hemmati *et al* (2018) گزارش کردند که کاربرد براسینواستروئید از طریق افزایش پرولین و نیز محتوای آب برگ سبب بهبود مقاومت همیشه‌بهار به تنش خشکی و افزایش عملکرد شده است. افزایش پرولین از طریق تنظیم بیان ژن‌های تولیدکننده آن از اثرات بارز سالیسیلیک اسید تحت تنش خشکی گزارش شده است (Ghasemzadeh & Jaafar, 2012). کاربرد خارجی براسینواستروئید تجمع پرولین را با تنظیم رونویسی ژن و ترجمه بهبود می‌بخشد (Gruszka, 2020).

[1] Association of Official Analytical Chemists

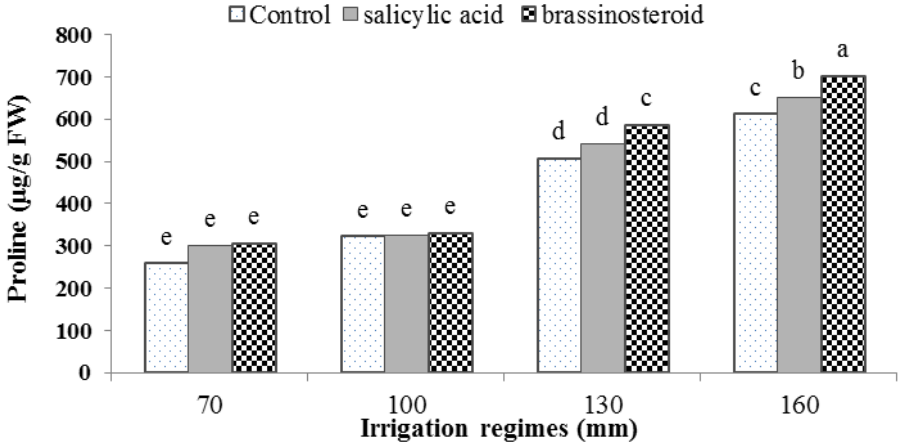
جدول ۲- تجزیه واریانس برخی صفات فیزیولوژیکی گشنیز تحت سطوح مختلف آبیاری و محلول‌پاشی تنظیم‌کننده‌های رشد

Table 2. Variance analysis of some physiological traits of coriander affected by drought stress and growth regulators

SOV	df	Mean of squares							
		Proline	Carotenoid	Chlorophyll a	Chlorophyll b	Catalase	Peroxidase	Ascorbate peroxidase	Polyphenol oxidase
Replication	2	305.36 **	0.0006 **	0.0004	0.0012 **	0.001	0.0002	0.00006	0.003
Irrigation (I)	3	266091.88 **	0.1004 **	0.0615 **	0.0138 **	6.791 **	0.5975 **	5.893 **	25.63 **
Error (a)	6	21.25	0.000008	0.0005	0.00002	0.002	0.0011	0.013	0.003
Regulator (R)	2	6782.69 **	0.0025	0.0247 **	0.0014	0.212 **	0.0775 **	0.263 **	0.412 **
R × I	6	1420.25 *	0.0005	0.0003	0.00002	0.019 *	0.0027	0.009	0.014
Error (b)	16	434.73	0.0009	0.0019	0.0011	0.005	0.0057	0.02	0.012
C.V (%)	-	4.56	8.31	5.48	9.62	4.73	7.64	5.14	3

* و **: به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

* and **: Significant at 5% and 1% of probability levels, respectively.



شکل ۱- محتوای پرولین برگ گشنیز تحت سطوح مختلف آبیاری در واکنش به تنظیم‌کننده‌های رشد

Figure 1. Proline content of coriander leaves affected by different irrigation intervals in response to growth regulators

محتوای کاروتنوئید برگ

اثر آبیاری بر محتوای کاروتنوئید برگ گشنیز معنی‌دار بود. اثر محلول‌پاشی و اثر متقابل این تیمارها برای این صفت معنی‌دار نشد (جدول ۲). تشدید کم‌آبی به افزایش میانگین محتوای کاروتنوئید برگ گشنیز منجر شد. محتوای کاروتنوئید برگ در تیمارهای آبیاری I_3 و I_4 به‌طور معنی‌داری بیشتر از سایر فواصل آبیاری بود و محتوای کاروتنوئید برگ تحت تیمارهای آبیاری I_1 و I_2 مشابه بود (جدول ۳).

تنش کم‌آبی می‌تواند موجب ایجاد تنش اکسیداتیو شود (Chaves & Oliveira, 2004) که این فرایند نقش ویژه‌ای در تخریب سامانه فتوسنتزی، تخریب غشای سلولی و کلروپلاستی و کاهش توانایی فتوسنتز ایفا می‌کند (Belin *et al*., 2010). در این راستا، گیاهان قادرند با تولید ترکیبات آنتی‌اکسیدان مانند کاروتنوئیدها از ساختارهای سلولی خود در برابر رادیکال‌های آزاد تولیدشده در شرایط تنش محافظت کنند (Bettaieb *et al*., 2011). نقش کاروتنوئیدها در دفاع آنتی‌اکسیدانی بسیار مهم است. گونه‌های گیاهی برخوردار از محتوای کاروتنوئیدی بالاتر، در تنش اکسیداتیو ناشی از تنش کم‌آبی، دفاع مؤثرتری دارند و تحمل بهتری در برابر تنش خشکی نشان می‌دهند (Gitelson *et al*., 2002).

جدول ۳- میانگین صفات فیزیولوژیکی و عملکرد دانه و روغن گشنیز تحت تیمارهای مختلف آبیاری و هورمونی

Table 3. Means of physiological traits, grain and oil yields of coriander affectd by irrigation levels and hormone

	Carotenoid (mg/g FW)	Chlorophyll a (mg/g FW)	Chlorophyll b (mg/g FW)	Peroxidase (unit mg protein^{-1} min^{-1})	Ascorbate peroxidase (mmol ascorbate oxidized mg^{-1} min^{-1})	Polyphenol oxidase (unit mg protein^{-1} min^{-1})	Soluble carbohydrates (mg.g^{-1}dw^{-1})	Anthocyanin (µmol g^{-1} fw)	Grain yield (g m^{-2})	Oil percentage (%)	Oil yield (kg ha^{-1})
Irrigation											
I_1	0.27 b	0.87 a	0.37 a	0.74 c	1.57 c	1.79 d	2.97 c	5.6 d	638.78 a	11.78 b	75.41 a
I_2	0.28 b	0.85 a	0.38 a	0.82 c	3.01 b	2.61 c	3.13 c	5.94 c	465.35 b	12.98 a	60.58 b
I_3	0.47 a	0.77 b	0.33 b	1.08 b	3.41 a	4.42 b	4.59 b	6.87 b	239.96 c	10.76 c	25.91 c
I_4	0.44 a	0.69 c	0.29 c	1.31 a	3.04 b	5.51 a	5.67 a	7.42 a	158.42 d	9.96 d	15.86 d
Regulator											
Control	0.36 a	0.76 b	0.34 a	0.9 b	2.59 b	3.38 c	3.89 b	6.25 b	343.25 c	11.15 a	39.96 c
brassinosteroid	0.37 a	0.78 b	0.34 a	1.01 a	2.86 a	3.75 a	4.12 a	6.46 ab	376.41 b	11.37 a	44.44 b
salicylic acid	0.39 a	0.84 a	0.36 a	1.05 a	2.82 a	3.61 b	4.25 a	6.66 a	407.23 a	11.6 a	48.92 a

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون، اختلاف معنی‌داری با هم در سطح احتمال پنج درصد بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن ندارند. I_1، I_2، I_3 و I_4: به‌ترتیب آبیاری پس از ۷۰، ۱۰۰، ۱۳۰ و ۱۶۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک کلاس A.

Different letters in the same column indicate significant difference at $P \leq 0.05$ (Duncan multiple range test). I_1, I_2, I_3, I_4: irrigation after 70, 100, 130 and 160 mm evaporation, respectively.

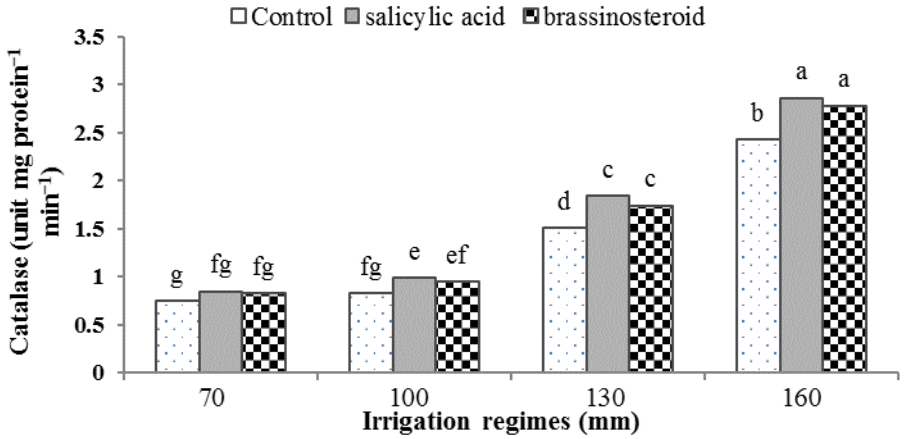
کلروفیل‌های a و b

بر اساس جدول ۲، اثر آبیاری بر محتوای کلروفیل‌های a و b معنی‌دار بود. محتوای کلروفیل a به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر تیمار محلول‌پاشی قرار گرفت و با کاهش آب قابل‌دسترس برای گیاه، محتوای کلروفیل‌های a و b برگ گشنیز کاهش یافت. میانگین این صفات در سطوح اول (I_1) و دوم (I_2) آبیاری بیشتر از سایر تیمارهای آبیاری بود که از این نظر بین تیمارهای آبیاری I_1 و I_2 تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد (جدول ۳). محلول‌پاشی با سالیسیلیک اسید، محتوای کلروفیل a را نسبت به شاهد ۱۱/۵ درصد افزایش داد (جدول ۳). یکی از عوامل کاهش کلروفیل، رقابت آنزیم گلوتامیل کیناز (آنزیم کاتالیزکننده پرولین) و آنزیم گلوتامات لیگاز (اولین آنزیم مسیر بیوسنتز کلروفیل) در شرایط تنش خشکی است (Hafeez *et al*., 2013). به دلیل این‌که در گشنیز تجمع پرولین، مکانیزم دفاعی مهمی تحت تیمارهای آبیاری محدود بوده است (جدول ۳)، پیش‌ماده گلوتامات در بیوسنتز کلروفیل با محدودیت مواجه شده است. کاهش کلروفیل ناشی از تنش خشکی، استفاده از تابش نور را پایین می‌آورد؛ به دلیل این‌که جذب انرژی مازاد توسط دستگاه فتوسنتزی، اغلب تولید گونه‌های فعال اکسیژن را تحریک می‌کند که این وضعیت با تخریب رنگیزه‌های جذب‌کننده نور تا حدودی قابل‌کنترل است (Mafakheri *et al*., 2010). کاهش میزان کلروفیل در گشنیز تحت تنش خشکی با سایر یافته‌ها در این گیاه (Yeganehpoor *et al*., 2017) مطابقت دارد. افزایش محتوای کلروفیل a برگ گشنیز با مصرف سالیسیلیک اسید نیز به دلیل اثرات مثبت این هورمون بر متابولیسم، بیوسنتز، فعالیت‌های اکسیداتیو و فعالیت‌های بیولوژیکی نظیر رشد و نمو، فتوسنتز، جذب و انتقال یون‌ها، تغییر فعالیت برخی آنزیم‌های مهم و ساختار کلروپلاست است (Nematollahi *et al*., 2012). محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک در ارقام زراعی آویشن نیز محتوای کلروفیل برگ را تحت شرایط تنش خشکی افزایش داده و خسارت ناشی از خشکی را کاهش داده است (Mohammadi *et al*., 2019).

فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان

تجزیه واریانس داده‌ها نشان می‌دهد که فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز، آسکوربات پراکسیداز و پلی‌فنل‌اکسیداز برگ‌های گشنیز به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر آبیاری و محلول‌پاشی هورمونی قرار گرفتند. اثر متقابل آبیاری × محلول‌پاشی بر فعالیت آنزیم کاتالاز معنی‌دار بود (جدول ۲) و با افزایش تنش کم‌آبی، فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز، آسکوربات پراکسیداز و پلی‌فنل‌اکسیداز افزایش یافت. کاربرد سالیسیلیک اسید و به‌ویژه براسینواستروئید به‌طور معنی‌داری فعالیت این آنزیم‌ها را افزایش داد (جدول ۳). محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید و به‌ویژه براسینواستروئید در سطوح مختلف آبیاری، منجر به بهبود فعالیت آنزیم کاتالاز شد، ولی این اثر تحت سطوح تنش متوسط و شدید خشکی بارزتر بود. بر این اساس، بیشترین فعالیت آنزیم کاتالاز ($unit\ mg\ protein^{-1}\ min^{-1}$ ۲/۸۶) تحت تیمار آبیاری I_4 با محلول‌پاشی براسینواستروئید حاصل شد (شکل ۲). تنش خشکی مانند سایر تنش‌های محیطی موجب تجمع گونه‌های فعال اکسیژن در سلول می‌شود. گیاهان برای مقابله با تنش اکسیداتیو ایجادشده، دارای سیستم دفاعی کارآمد شامل آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان هستند که این آنزیم‌ها از غشاها، پروتئین‌ها و ماکرومولکول‌ها در مقابل خسارت‌های گونه‌های فعال اکسیژن محافظت می‌کنند و موجب مقاومت و پایداری گیاهان در برابر تنش‌های محیطی مانند خشکی می‌شوند (Ghassemi-Golezani *et al*., 2018)؛ بنابراین، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گیاهان با تحمّل تنش رابطه مستقیم دارد (Mittler, 2002). Ghassemi-Golezani *et al* (2018) نیز افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مانند آسکوربات‌پراکسیداز را تحت تنش گزارش کردند. بسیاری از پژوهشگران افزایش فعالیت آنزیم پراکسیداز را به‌عنوان یک عامل کلیدی برای حفاظت گیاهان در مواجهه با تنش‌های محیطی عنوان نموده‌اند (Ghassemi-Golezani *et al*., 2018)، زیرا پراکسیداز موجب حذف پراکسیدهیدروژن در

کلروپلاست می‌شود و از اثرات مخرب آن بر فتوسنتز و کلروپلاست جلوگیری می‌کند (Shen *et al*., 1997). سالیسیلیک اسید یک مولکول پیام‌رسان مهم در شرایط تنش‌های محیطی است و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مستقیم یا غیرمستقیم توسط آن سازمان‌دهی می‌شود. سالیسیلیک اسید موجب افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان می‌شود و از این طریق صدمات اکسیداتیو در گیاه را کاهش می‌دهد (Senaratna *et al*., 2000). افزایش سرعت فتوسنتز از طریق تنظیم تولید ابسیزیک اسید و بهبود سیستم آنتی‌اکسیدانی آنزیمی و غیر آنزیمی ازجمله تنظیم بیان ژن‌های تولیدکننده آنزیم‌های کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز و آسکوربات پراکسیداز از اثرات بارز براسینواستروئیدها تحت تنش خشکی گزارش‌شده است (Fariduddin *et al*., 2009).



شکل ۲- تغییرات فعالیت آنزیم کاتلاز تحت تاثیر سطوح مختلف آبیاری در واکنش به تنظیم‌کننده‌های رشد

Figure 2. Changes in catalase enzyme activity affectd by different irrigation intervals in response to growth regulators

محتوای قند و آنتوسیانین

اثر آبیاری و محلول‌پاشی هورمونی بر محتوای قندهای محلول و آنتوسیانین معنی‌دار شد، ولی اثر متقابل آبیاری × هورمون معنی‌دار نشد (جدول ۴). با افزایش شدت تنش، محتوای قندهای محلول و آنتوسیانین افزایش یافت. محلول‌پاشی هورمونی سبب افزایش معنی‌دار این صفات شد. بیشترین مقدار قندهای محلول و آنتوسیانین به تیمار سالیسیلیک اسید اختصاص داشت و از نظر آماری، محتوای قندهای محلول برای تیمار سالیسیلیک اسید و براسینواستروئید مشابه بود (جدول ۳).

Rechinger (1982) عنوان نمود که قندهای محلول در تمام بافت‌های گیاهان تحت شرایط نامساعد محیطی تجمع می‌یابد که میزان تجمع آن‌ها در برگ‌ها بیش از سایر اندام‌ها است. تجمع قندهای محلول در گیاهان تحت تنش با نقش آن‌ها در تنظیم اسمزی و حفظ آماس سلولی و همچنین با پایدار کردن غشاهای سلولی و پروتئین‌ها در ارتباط است (Mundree *et al*., 2002). محتوای قند محلول بالاتر گیاهان محلول‌پاشی شده با سالیسیلیک اسید، به دلیل دارا بودن محتوای کلروفیل بیشتر (جدول ۳) و در نتیجه فتوسنتز بالاتر است. Khodary (2004) عنوان نمود که سالیسیلیک اسید به دلیل حفظ مقدار رنگیزه‌های فتوسنتزی و احتمالا ساختار و فعالیت آنزیم روبیسکو، سبب افزایش مقدار قندها در شرایط تنش می‌شود. به نظر می‌رسد که سالیسیلیک اسید از طریق فعال کردن سوخت‌وساز قندهای محلول، سبب تشکیل ترکیبات جدید سلولی به‌عنوان مکانیسمی برای تحریک رشد گیاهان می‌شود. همچنین ممکن است از یک‌سو سیستم آنزیمی پلی‌ساکارید-هیدرولیز و از سوی دیگر سرعت تبدیل قندهای محلول به پلی‌ساکاریدها را برای حفظ قندهای محلول در شرایط

تنش محدود کند (Khodary, 2004). افزایش قندهای محلول در گندم پس از محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید در شرایط تنش و بدون تنش گزارش‌شده است (El-Tayeb & Ahmad, 2010).

جدول ۴- تجزیه واریانس برخی صفات فیزیولوژیکی، عملکرد دانه و روغن گشنیز تحت سطوح مختلف آبیاری و محلول‌پاشی تنظیم‌کننده‌های رشد

Table 4. Variance analysis of some physiological traits of coriander affected by drought stress and growth regulators

SOV	df	Mean of squares				
		Soluble carbohydrates	Anthocyanin	Grain yield	Oil percentage	Oil yield
Replication	2	0.008	0.016	278.89	0.03	8.04
Irrigation (I)	3	14.76 **	6.329 **	428661.11 **	15.388 **	7140.08 **
Error (a)	6	0.014	0.018	86.37	0.065	3.83
Regulator (R)	2	0.398 **	0.508 **	12283.81 **	0.585	240.56 **
R × I	6	0.011	0.018	469.71	0.042	12.43
Error (b)	16	0.033	0.064	637.91	0.248	25.77
C.V (%)	-	4.46	3.93	6.72	4.37	11.42

* و **: به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

* به دلیل بیشتر بودن خطای فرعی از اصلی در نتایج تجزیه واریانس داده‌ها برای اکثر صفات موردبررسی از ادغام خطای اصلی و فرعی (pooling) به‌منظور افزایش درجه آزادی خطا و قدرت آزمون استفاده شد و معنی‌داری تیمارها برای صفات بر اساس خطای جدید حاصل از ادغام خطای اصلی و فرعی سنجیده شد.

* and **: Significant at 5% and 1% of probability levels, respectively.

Since the minor error was more than the main one in the results of the data variance analysis, pooling of the main and minor error (pooling) of the most of the examined traits was used to increase the degree of freedom of the error and the power of the test, and the significance of the treatments for the traits was measured based on the new error derived from the main and minor errors integration.

کاربرد براسینواستروئید با افزایش میزان اسمولیت‌هایی مانند پرولین و قندهای محلول، سبب افزایش ویژگی اسمزی برگ و افزایش مقاومت به خشکی می‌شود (Nawaz *et al*., 2017). افزایش محتوای قندهای محلول بر اثر کاربرد براسینواستروئید تحت تنش خشکی در رازیانه نیز گزارش‌شده است (Parmoon *et al*., 2019). تنش کم‌آبی، تولید آنتوسیانین را افزایش داد، به‌طوری‌که کمترین مقدار آن در شرایط بدون تنش مشاهده شد (جدول ۳). افزایش محتوای آنتوسیانین در شرایط تنش توسط Palliotti *et al*. (2011) نیز گزارش‌شده است. آنتوسیانین‌ها مهم‌ترین گروه از رنگیزه‌های محلول در گیاهان هستند که اثرات مفیدی به‌عنوان یک آنتی‌اکسیدان دارند. افزایش محتوای آنتوسیانین با تشدید تنش (جدول ۳) حاکی از آن است که گشنیز نسبت به افزایش تنش، تحمل نشان می‌دهد. استفاده از سالیسیلیک اسید در مسیر بیوسنتز آنتوسیانین اثر می‌گذارد (Chae *et al*., 2003) و این رنگیزه را افزایش می‌دهد (جدول ۳). در زنجبیل نیز سالیسیلیک اسید باعث القای سنتز آنتوسیانین می‌شود (Ghasemzadeh & Jaafar, 2012). کاربرد براسینواستروئید به‌طور قابل‌توجهی فعالیت PAL[1] (فنیل‌آلانین آمونیالیاز) را بهبود می‌بخشد و سبب افزایش تولید آنتوسیانین می‌شود (Yuan *et al*., 2015). Vergara *et al* (2020) نیز گزارش نمودند که براسینواستروئید فعالیت PAL را به‌عنوان یک آنزیم کلیدی در بیوسنتز آنتوسیانین افزایش می‌دهد.

عملکرد دانه

بر اساس جدول ۴، بین سطوح آبیاری و محلول‌پاشی از نظر محصول دانه اختلاف معنی‌داری وجود داشت و اثر متقابل آبیاری × محلول‌پاشی برای محصول دانه گشنیز معنی‌دار نبود. تحت تنش کم‌آبی ملایم (I_2)، متوسط (I_3) و شدید (I_4)، محصول دانه به‌ترتیب ۲۷/۱، ۶۲/۴ و ۷۵/۱ درصد کمتر از آبیاری مطلوب (I_1) بود (جدول ۳). کاربرد هر دو تنظیم‌کننده رشد، سبب بهبود عملکرد دانه گشنیز شد، اما محلول‌پاشی با سالیسیلیک اسید، بیشترین محصول دانه را تولید کرد که نسبت به شاهد، این صفت را ۱۸/۱ درصد

[1] Phenylalanine ammonia-lyase

افزایش داد. بین سطوح محلول‌پاشی با سالیسیلیک اسید و براسینواستروئید تفاوت معنی‌داری ازنظر آماری مشاهده شد (جدول ۳). در شرایط کم‌آبی، روزنه‌های گیاه نیمه بسته یا بسته می‌شوند که این امر موجب کاهش جذب CO_2 می‌شود. از طرفی گیاه برای جذب آب، انرژی زیادی مصرف می‌کند و تحت تنش، تعداد برگ خود را کاهش می‌دهد که این امر به کاهش تولید مواد فتوسنتزی و درنتیجه افت انتقال مواد به دانه‌ها منجر می‌شود (Belin *et al*., 2010) که نتیجه آن کاهش محصول دانه (جدول ۳) است. افت محصول دانه با افزایش فواصل آبیاری در گیاهان دارویی بادرشبو (Abaspour & Rezaei, 2014) و زیره سیاه (Laribi *et al*., 2009) نیز گزارش‌شده است. اثر مفید سالیسیلیک اسید بر عملکرد دانه ممکن است با انتقال بیشتر مواد پرورده به دانه‌ها در طی پر شدن مرتبط باشد. این یافته با نتایج Ghassemi-Golezani *et al*. (2018) مرتبط است. آن‌ها گزارش نمودند که استفاده از سالیسیلیک اسید در زنیان، وزن هزار دانه را نسبت به تیمار شاهد به‌طور معنی‌داری افزایش داده است. Wu *et al* (2008) گزارش کردند که کاربرد براسینواستروئید با افزایش سرعت فتوسنتز، میانگین تعداد دانه در بوته و وزن هزار دانه، موجب بهبود عملکرد دانه برنج شده است.

درصد روغن دانه

درصد روغن دانه گشنیز به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر سطوح آبیاری قرار گرفت (جدول ۴) و بین سطوح مختلف تیمار محلول‌پاشی از این نظر اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. اثر متقابل آبیاری × محلول‌پاشی بر این صفت غیر معنی‌دار بود. درصد روغن دانه گشنیز با افزایش فواصل آبیاری تا تنش ملایم (I_2) افزایش یافت، ولی تحت تنش متوسط (I_3) و شدید خشکی (I_4) افت پیدا کرد (جدول ۳). میانگین درصد روغن دانه گشنیز در این بررسی نه تا ۱۳ درصد بود (جدول ۳). تحت تنش خشکی، دوره پر شدن دانه کاهش می‌یابد و در نتیجه از مقدار انتقال فراورده‌های فتوسنتزی به دانه کاسته می‌شود. به‌دلیل همبستگی منفی که بین درصد روغن و پروتئین دانه وجود دارد، با افزایش درصد پروتئین دانه تحت شرایط کمبود آب، از میزان روغن دانه کاسته می‌شود. از آن‌جا که در شرایط تنش، به دلیل کاهش فتوسنتز خالص و کاهش انتقال مواد فتوسنتزی به دانه‌ها، از وزن دانه کاسته می‌شود و نسبت پروتئین دانه به روغن افزایش می‌یابد، در نتیجه درصد روغن دانه کاهش پیدا می‌کند (Fanaei *et al*., 2015). کاهش درصد روغن دانه با تشدید کم‌آبی در گلرنگ (Fanaei *et al*., 2015) نیز گزارش‌شده است.

عملکرد روغن دانه

بین سطوح آبیاری و محلول‌پاشی ازنظر عملکرد روغن در واحد سطح اختلاف معنی‌داری وجود داشت. اثر متقابل آبیاری × محلول‌پاشی برای عملکرد روغن غیرمعنی‌دار بود (جدول ۴). بیشترین عملکرد روغن دانه گشنیز (۷۵/۴ کیلوگرم در هکتار) از دانه گیاهان آبیاری شده با فواصل ۷۰ میلی‌متر تبخیر (I_1) به‌دست آمد و با تشدید کم‌آبی، میانگین عملکرد روغن گشنیز کاهش نشان داد، به‌طوری‌که تحت تیمار آبیاری I_4 به ۱۵/۸ کیلوگرم در هکتار رسید (جدول ۳). کاربرد هر دو تنظیم‌کننده رشد سبب بهبود محصول روغن دانه در واحد سطح شد، اما بیشترین محصول روغن از تیمار محلول‌پاشی با سالیسیلیک اسید به‌دست آمد که نسبت به شاهد ۲۲/۴ درصد افزایش نشان داد. بین سطوح محلول‌پاشی با سالیسیلیک اسید و براسینواستروئید تفاوت معنی‌داری ازنظر آماری مشاهده شد (جدول ۳).

محصول روغن دانه، تابعی از درصد روغن و عملکرد دانه هست. در این پژوهش، درصد روغن دانه و عملکرد دانه تحت تنش خشکی افت پیدا کردند و در نتیجه محصول روغن کاهش یافت. چون عملکرد روغن از حاصل‌ضرب درصد روغن در عملکرد دانه به دست می‌آید، به دلیل این‌که کاربرد سالیسیلیک اسید و براسینواستروئید موجب افزایش محصول دانه شده بود (جدول ۳)، محلول‌پاشی با سالیسیلیک اسید و براسینواستروئید سبب افزایش عملکرد روغن در واحد سطح شد. Shubhra *et al* (2004) دریافتند که محصول دانه و روغن در همیشه‌بهار در شرایط تنش خشکی به‌شدت کاهش‌یافته است. به گزارش Yeganehpoor *et al*. (2017) تنش خشکی به دلیل

کاهش میزان آب خاک و فعال نمودن فرایندهای مختلف در گیاه که با مصرف انرژی همراه می‌باشد، بر صفات کیفی گشنیز اثر گذاشته است و سبب کاهش عملکرد روغن این گیاه شده است.

نتایج تحقیق Sibi *et al*. (2012) نیز مؤید افزایش درصد روغن در دانه گلرنگ با مصرف سالیسیلیک اسید می‌باشد. این‌چنین به نظر می‌رسد که در گیاهانی که بذرشان با سالیسیلیک اسید پیش‌تیمار شده باشند، افزایش سطح برگ و استفاده بهینه از تابش‌های خورشیدی و افزایش سرعت فتوسنتز خالص ناشی از مصرف سالیسیلیک اسید (Yeganehpoor *et al*., 2017) باعث افزایش عملکرد دانه، درصد روغن و شاخص برداشت دانه و روغن در گشنیز شده است. افزایش بیان ژن‌های مسئول در بیوسنتز اسیدهای چرب روغن دانه و نیز عملکرد دانه، از دلایل اصلی افزایش عملکرد روغن دانه براثر کاربرد براسینواستروئید گزارش‌شده است (Yin *et al*., 2019).

نتیجه‌گیری کلی

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق، محلول-پاشی سالیسیلیک اسید و براسینواستروئید با افزایش غلظت پرولین، محتوای کلروفیل a برگ، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان کاتالاز، پراکسیداز، آسکوربات پراکسیداز و پلی‌فنل اکسیداز و محتوای قندهای محلول و آنتوسیانین، در رفع اثرات منفی تنش کم‌آبی نقش دارد و کاربرد این تنظیم‌کننده‌های رشد به‌طور مؤثری موجب بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و نیز عملکرد دانه و روغن گشنیز شد. می‌توان اظهار داشت که گشنیز گیاهی حساس به کم‌آبی است و افزایش فواصل آبیاری، رشد، عملکرد دانه (۷۵/۱ درصد) و تولید روغن (۷۸/۹ درصد) این گیاه دارویی را محدود ساخته است. محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید در اغلب صفات مورد بررسی و به‌ویژه محصول دانه، مزیت معنی‌داری (۱۸/۶ درصد) نسبت به براسینواستروئید نشان داد؛ بنابراین کاربرد سالیسیلیک اسید را می‌توان به‌عنوان تیمار مناسب برای بهبود تولید دانه و روغن گشنیز معرفی نمود.

REFERENCES

1. Abaspour, H. & Rezaei, H. (2014). Effects of salicylic acid and jasmonic acid on hill reaction and photosynthetic pigment (*Dracocephalum moldavica* L.) in different levels of drought stress. *International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research*, 2, 2850-2859.
2. Ahammed, G., Xia, X., Li, X., Shi, K., Yu, J. & Zhou, Y. (2014). Role of brassinosteroid in plant adaptation to abiotic stresses and its interplay with other hormones. *Current Protein & Peptide Science*, 16(5), 462-473.
3. AOAC. (1990). Fatty acids in oil and fats. In: K. Helrich (Ed), *Official methods of analysis*. 15th edition, (pp. 963-964.) USA.
4. Azarakhshi, M., Farzadmehr, L., Eslah, M. & Sahabi, H. (2013). An investigation on trends of annual and seasonal rainfall and temperature in different climatologically regions of Iran. *Journal of Range Water Management*, 66, 1-16. (In Persian)
5. Bates, L. S., Waldren, R. P. & Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 39, 205-207.
6. Belin, C., Thomine, S. & Schroeder, J. I. (2010). Water balance and the regulation of stomatal movements. In: A. Pareek, S. K. Sopory, H. J. Bohnert (Ed), *Abiotic stress adaptation in plants*. (pp. 283-305.) Springer, Dordrecht, Netherlands,
7. Bettaieb, I., Hamrouni-Sellami, I., Bourgou, S., Limam, F. & Marzouk, B. (2011). Drought effects on polyphenol composition and antioxidant activities in aerial parts of *Salvia officinalis* L. *Acta Physiologiae Plantarum*, 33, 1103-1111.
8. Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Annual Biochemistry*, 72, 248-254.
9. Chae, H. S., Faure, F. & Kieber, J. J. (2003). The *eto*1, *eto*2, and *eto*3 mutations and cytokinin treatment increase ethylene biosynthesis in *Arabidopsis* by increasing the stability of ACS protein. *Plant and Cell*, 15, 545-559.
10. Chance, B. & Maechly, A. C. (1995). Assay of catalases and peroxidase. *Methods in Enzyme*, 2, 764-775.

11. Chaves, M. M. & Oliveira, M. M. (2004). Mechanisms underlying plant resilience to water deficits: Prospects for water-saving agriculture. *Journal of Experimental Botany*, 55, 2365-2384.
12. El-Lateef-Gharib, F. (2006). Effect of salicylic acid on the growth, metabolic activities and oil content of basil and marjoram. *International Journal of Agriculture and Biology*, 8(4), 485-492.
13. El-Tayeb, M. A. & Ahmed, N. L. (2010). Response of wheat cultivars to drought and salicylic acid. *American-Eurasian Journal of Agronomy*, 3, 1-7.
14. Fanaei, H., Keikha, H. & Piri, I. (2015). Effect of seed priming on grain and oil yield of safflower under water deficit conditions. *Iranian Journal of Seed Science and Research*, 2(2), 49-59. (In Persian)
15. FAO. (2019). Agricultural production statistics. Available online at: http://faostat3.fao.org/compare/E.
16. Fariduddin, Q., Khanam, S., Hasan, S. A., Ali, B., Hayat, S. & Ahmad, A. (2009). Effect of 28-homobrassinolide on drought stress induced changes in photosynthesis and antioxidant system of *Brassica juncea* L. *Acta Physiologiae Plantarum*, 31, 889-897.
17. Ghasemzadeh, A. & Jaafar, H. Z. (2012). Effect of salicylic acid application on biochemical changes in ginger (*Zingiber officinale* Roscoe). *Journal of Medicinal Plant Research*, 6, 790-795.
18. Ghasemzadeh, A., Talei, D., Jaafar, H. Z. E., Juraimi, A. S., Muda-Mohamed, M. T., Puteh, A. & Halim, M. R. A. (2016). Plant-growth regulators alter phytochemical constituents and pharmaceutical quality in Sweet potato (*Ipomoea batatas* L.). *BMC Complementary and Alternative Medicine*, 16, 152-166.
19. Ghassemi-Golezani, K., Ghassemi, S. & Zehtab-Salmasi, S. (2018). Changes in essential oil-content and composition of ajowan (*Carum copticum* L.) seeds in response to growth regulators under water stress. *Scientia Horticulturae*, 231, 219-226.
20. Gitelson, A. A., Zur, Y., Chivkunova, O. B. & Merzlyak, M. N. (2002). Assessing carotenoid content in plant leaves with reflectance spectroscopy. *Photochemistry and Photobiology*, 75, 272-281.
21. 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, 54-66.
22. Hafeez, B., Khanif, Y. M. & Saleem, M. (2013). Role of zinc in plant nutrition - a review. *American Journal of Experimental Agriculture*, 3, 374-391.
23. Hemmati, K. H., Ebadi, A., Khomari, S. & Sedghi, M. (2018). Influence of ascorbic acid and 24-epibrassinolide on physiological characteristics of pot marigold under water-stress conditions. *Journal of Plant Interactions*, 13(1), 364-372.
24. Jaleel, C. A., Manivannan, P., Wahid, A., Farooq, M., Al-Juburi, H. J., Somasundaram, R. & Panneerselvam, R. (2009). Drought stress in plants: a review on morphological characteristics and pigments composition. *International Journal of Agriculture and Biology*, 11, 100-105.
25. Kar, M., & Mishra, D. (1976). Catalase, peroxidase, polyphenol oxidase activities during rice leaf senescence. *Plant Physiology*, 57, 315-319.
26. Khodary, S. E. A. (2004). Effect of salicylic acid on the growth, photosynthesis and carbohydrate metabolism in salt-stressed maize plants. *International Journal of Agriculture and Biology*, 6, 5-8.
27. Kochert, G. (1978). Carbohydrate determination by the phenol sulfuric acid method. In: J. A. Hellebust, J. S. Craigie (Ed), *Handbook of Phycological Methods*. (pp. 95-97) Physiological and Biochemical Methods.
28. Krishna, P., Prasad, B. D. & Rahman, T. (2017). Brassinosteroid action in plant abiotic stress tolerance. *Methods in Molecular Biology*, 1564, 193-202.
29. Laribi, B., Bettaieb, I., Kouki, K., Sahli, A., Mougou, A. & Mazrouk, B. (2009). Water deficit effects on caraway (*Carum carvi* L.) growth, essential oil and fatty acid composition. *Industrial Crops and Products*, 30, 372-379.
30. Lichtenthaler, H. K. & Buschmann, C. (2001). Chlorophylls and carotenoids: measurement and characterization by UV-VIS. *Biochemical Society Transactions*, 11, 591-592.
31. Lisar, S. Y. S., Motafakkerazad, R., Hossain, M. M. & Rahman, I. M. M. (2012). Water stress in plants: causes, effects and responses. In: I. M. M. Rahman (Ed), *Water Stress*. (pp. 1-14). In Tech Publications.
32. Mafakheri, A., Siosemardeh, A., Bahramnejad, B., Struik, P. C. & Sohrabi, Y. (2010). Effect of drought stress on yield, proline and chlorophyll content in three Chickpea cultivars. *Australian Journal of Crop Science*, 4, 580-585.
33. Mittler, R. (2002). Oxidative stress, antioxidant and stress tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 7, 405-415.

34. Mohammadi, H., Amirikia, F., Ghorbanpour, M., Fatehi, F. & Hashempour, H. (2019). Salicylic acid induced changes in physiological traits and essential oil constituents in different ecotypes of *Thymus kotschyanus* and *Thymus vulgaris* under well-watered and water stress conditions. *Industrial Crops and Products*, 129, 561-574.
35. Mundree, S. G., Baker, B., Mowla, S. H., Peters, S, Marais, S., Willigen, C. V., Govender, K., Maredza, A., Muyanga, S., Farrant, J. M. & Thomson, J. A. (2002). Physiological and molecular insights into drought tolerance. *African Journal* of *Biotechnology*, 1, 28-38.
36. Nakano, Y. & Asada, K. (1981). Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in Spinach chloroplasts. *Plant Cell Physiology*, 22, 867-280.
37. Nawaz, F., Naeem, M. & Zulfiqar, B. (2017). Understanding brassinosteroid-regulated mechanisms to improve stress tolerance in plants: a critical review. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 15959-15975.
38. Nematollahi, E., Jafari, A. & Bagheri, A. (2012). Effect of drought stress and salicylic acid on photosynthesis pigments and macronutrient absorption in two sunflower (*Helianthus annuus* L.) cultivars. *Journal of Plant Ecophysiology*, 5, 37-51. (In Persian)
39. Nourzad, S., Ahmadian, A., Moghaddam, M. & Daneshfar, E. (2014). Effect of drought stress on yield, yield components and essential oil in coriander (*Coriandrum sativum* L.) treated with organic and inorganic fertilizers. *Journal of Crop Improvement*, 2, 289-302. (In Persian)
40. Omidbeigi, R. (2000). *Production and Processing of Medicinal Plants*. Vol. 3, Astan Quds Razavi Press. (In Persian)
41. Palliotti, A., Poni, S., Silvestroni, O., Tombesi, S. & Bernizzoni, F. (2011). Morpho-structural and physiological performance of *Sangiovese* and *Montepulciano* (*Vitis vinifera*) under non-limiting water supply conditions. *Functional Plant Biology*, 38, 888-898.
42. Parmoon, G., Ebadi, A. & Jahanbakhsh, S. (2019). Physiological response of fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.) to drought stress and plant growth regulators. *Russian Journal of Plant Physiology*, 66, 795-805.
43. Rahbarian, P. & Salehi Sardoei, A. (2014). Effects of drought stress and manure on herb yield and essential oil of dragonhead (*Dracocephalum moldavica*). In: Proceedings of *2nd congress of Organic Agriculture*, Ardabil, pp. 212-217.
44. Rahimi, Z. & Kafi, M. (2009). Effects of drought stress on germination characteristics of purslane (*Portulaca oleracea* L.). *Environmental Stresses in Agricultural Sciences*, 2(1), 87-91.
45. Ramrodi, M. & Khamr, R. (2013). Interaction effects of salicylic acid spraying and different irrigation intervals on some quantity and quality traits and osmoregulators in basil (*Ocimum basilicum*). *Journal of Applied Research of Plant Ecophysiology*, 1(1), 19-31. (In Persian)
46. Rechinger, K. (1982). *Flora Iranica*. N150, Academishe Druk. Verlag Sustalt Gratz, 439 p.
47. Seki, M., Umezawa, T., Urano, K. & Shinozaki, K. (2007). Regulatory metabolic networks in drought stress responses. *Current Opinion in Plant Biology*, 10, 296-302.
48. Senaratna, T., Touchell, D., Bunn, E. & Dixon, K. (2000). Acetyl salicylic acid (Aspirin) and salicylic acid induce multiple stress tolerance in bean and tomato plant. *Plant Growth Regulation*, 30, 157-161.
49. Setayesh-mehr, Z. & Ganjali, A. (2013). Effects of drought stress on growth and physiological characteristics of *Anethum* graveolens L. *Iranian Journal of Horticultural Science*, 27, 27-35. (In Persian)
50. Sharififar, F., Moshafi, M. H. & Mansouri, S. H. (2017). *In vitro* evaluation of antibacterial and antioxidant of the essential oil and methanol extract of *Zataria multiflora*. *Food Control*, 18, 800-805.
51. Shen, B., Jensen R. G. & Bohnert, H.J. (1997). Mannitol protects against oxidation by hydroxyl radicals. *Plant Physiology*, 115, 527-532.
52. Shubhra, K., Dayal, J., Goswami, C. L. & Munjal, R. (2004). Effects of water-deficit on oil of *Calendula* aerial parts. *Biologia Plantarum*, 48(3), 445-448.
53. Sibi, M., Mirzakhani, M. & Gomarian, M. (2012). Response of physiological characteristics to water stress, application of salicylic acid and zeolite in Safflower. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 4(4), 151-156.
54. Tari, I., Csiszar, J., Szalai, G., Horvath, F., Pecsvaradi, A., Kiss, G., Szepesi, A., Szabo, M. & Redei, L. (2002). Acclimation of tomato plants to salinity stress after a salicylic acid pretreatment. *Acta Biomaterialia*, 46, 55-56.
55. Vergara, A., Torrealba, M., Alcalde, J. & Pérez-Donoso, A. (2020). Commercial brassinosteroid increases the concentration of anthocyanin in red tablegrape cultivars (*Vitis vinifera* L.). *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 26, 427-433.

56. Wagner, G. J. (1979). Content and vacuole/extra vacuole distribution of neutral sugars, free amino acids, and anthocyanin in protoplast. *Plant Physiology*, 64, 88-93.
57. Wang, X., Cai, X., Xu, C., Wang, Q. & Dai, S. (2016). Drought-responsive mechanisms in plant leaves revealed by proteomics. *International Journal of Molecular Sciences*, 17, 1-30.
58. Wu, C. Y., Trieu, A., Radhakrishnan, P., Kwok, S. F., Harris, S., Zhang, K., Wang, J., Wan, J., Zhai, H., Takatsuto, S., Matsumoto, S., Fujioka, S., Feldmann, K. A. & Pennell, R. I. (2008). Brassinosteroids regulate grain filling in rice. *The Plant cell*, 20(8), 2130-2145.
59. Yeganehpoor, F., Zehtab-Salmasi, S., Shafagh-Kolvanagh, J., Ghassemi-Golezani, K. & Dastborhan, S. (2017). Some morphological traits and oil content of coriander seeds in response to bio-fertilizer and salicylic acid under water stress. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*, 10, 140-149.
60. Yin, W., Dongm N., Niu, M., Zhang, X., Li, L., Liu, J., Liu, B. & Tong, H. (2019). Brassinosteroid-regulated plant growth and development and gene expression in soybean. *Crop Journal*, 7(3), 411-418.
61. Yuan, L. B., Peng, Z. H. & Zhi, T. T. (2015). Brassinosteroid enhances cytokinin-induced anthocyanin biosynthesis in *Arabidopsis* seedlings. *Biologia Plantarum*, 59, 99-105.
62. Zafari, M., Ebadi, A. & Jahanbakhsh, S. (2017). Effect brassinosteroid application on safflower cultivars tolerance to water stress in Ardabil. *Journal of Crop Production*, 10, 31-17. (In Persian)