

Changes in Physiological Traits, Grain and Oil Yields of Black Mustard (*Brassica nigra* L.) in Response to Foliar Application of Putrescine under Drought Stress

Kazem Ghassemi-Golezani^{1*}, Leila Abbasi², Roghayeh Solhi-khajehmarjan³

Received: 22 December 2021 Accepted: 4 June 2022

1-Prof., of Crop Science, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

2-MSc. in Crop Physiology, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

3-PhD. Student of Physiology Crop, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

*Corresponding Author Email: golezani@gmail.com

Abstract

Background and Objective: In order to investigate the effect of different levels of putrescine on physiological traits and oil production of Black mustard grains (*Brassica nigra* L.) under drought stress, an experiment was conducted in 2019 at the research farm of the Faculty of Agriculture, University of Tabriz.

Materials and Methods: The experiment was laid out as split plot on the basis of a randomized complete block design with three replications. Experimental treatments including irrigation intervals (I₁, I₂, I₃ and I₄: irrigation after 70, 100, 130, and 160 mm evaporation from class A pan, respectively) and putrescine foliar application (Pu₀, Pu₁, Pu₂: foliar spray of water and 50 and 100 μM putrescine, respectively) were assigned to the main and sub-plots, respectively.

Results: Green cover percentage, leaf chlorophyll index, photosystem II efficiency, leaf water content, yield components, grain yield and oil yield were decreased, but leaf temperature and electrolyte leakage were significantly increased as a consequence of severe drought stress. Foliar application of putrescine, especially at a concentration of 50 μM improved all of these traits under different irrigation levels.

Conclusion: Black mustard tolerates mild water deficit, but Severe stress causes a considerable decline in grain and oil yields. Foliar application of putrescine at a concentration of 50 μM is recommended as a suitable treatment to improve drought tolerance grain and oil production of black mustard. Therefore, application of putrescine can considerably reduce drought injuries on plants.

Keywords: Black Mustard, Chlorophyll Index, Electrolyte Leakage, Oil Content, Putrescine

تغییرات صفات فیزیولوژیکی، محصول دانه و روغن خردل سیاه (*Brassica nigra* L.) در واکنش به محلول پاشی پوترسین تحت تنش خشکی

کاظم قاسمی گلعدانی^{۱*}، لیلا عباسی^۲، رقیه صلحی خواجهمرجان^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۳/۱۴

۱- استاد گروه اکوفیزیولوژی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲- کارشناس ارشد فیزیولوژی گیاهان زراعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۳- دانشجوی دکتری فیزیولوژی گیاهان زراعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

اهداف: به منظور بررسی اثر سطوح مختلف پوترسین روی صفات فیزیولوژیکی و تولید روغن دانه‌های خردل سیاه (*Brassica nigra* L.) در شرایط تنش خشکی، آزمایشی در سال ۱۳۹۸ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز اجرا شد.

مواد و روش‌ها: آزمایشی به صورت کرت‌های خرد شده با طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار پیاده گردید. تیمارهای آزمایشی شامل فواصل آبیاری (I₁, I₂, I₃ و I₄: به ترتیب آبیاری پس از ۷۰، ۱۰۰، ۱۳۰ و ۱۶۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A) و محلول پاشی پوترسین (Pu₀, Pu₁, Pu₂: به ترتیب آب پاشی، ۵۰ و ۱۰۰ میکرومولار پوترسین) به ترتیب به کرت‌های اصلی و فرعی اختصاص یافتند.

یافته‌ها: بر اثر تنش شدید خشکی درصد پوشش سبز، شاخص کلروفیل برگ، کارایی فتوسیستم II، محتوای آب برگ، اجزای محصول، محصول دانه و محصول روغن کاهش، ولی دمای برگ و نشت الکترولیت‌ها به طور معنی‌داری افزایش یافت. محلول پاشی پوترسین به ویژه با غلظت ۵۰ میکرومولار در سطوح مختلف آبیاری موجب بهبود همه این صفات شد.

نتیجه‌گیری: خردل سیاه تنش ملایم کمبود آب را تحمل می‌نماید، ولی تنش شدید موجب افت قابل توجه محصول دانه و روغن آن می‌گردد. محلول پاشی پوترسین با غلظت ۵۰ میکرومولار به عنوان تیمار مناسب برای بهبود تحمل خشکی، تولید دانه و روغن خردل سیاه توصیه می‌شود. بنابراین، کاربرد پوترسین می‌تواند موجب کاهش قابل ملاحظه آسیب‌های ناشی از تنش خشکی در گیاهان گردد.

واژه‌های کلیدی: پوترسین، خردل سیاه، شاخص کلروفیل، محتوای روغن، نشت الکترولیت

مقدمه

متناوب و سرنیزه‌ای شکل و برگ‌های پایینی آن دارای دم‌برگ بوده و دندانه‌دار نیز هستند. این گیاه دارای گل‌های زردی به صورت خوشه‌ای بوده و به تدریج که گلدهی صورت می‌گیرد این خوشه‌ها بزرگتر می‌شوند

خردل سیاه (*Brassica nigra* L.) گیاه یک‌ساله روغنی از تیره شب بو با ارتفاع ۸۰ تا ۱۲۰ سانتی‌متر، رشد سریع و ساقه راست و منشعب است. برگ‌هایش

(واناساندرا جانیتا ۲۰۱۱). دانه‌های خردل حاوی روغن، پروتئین و غنی از فیبر غذایی و آنتی‌اکسیدان‌های طبیعی می‌باشد (یلدیکو و همکاران ۲۰۰۶).

کمبود آب مهم‌ترین عامل محدود کننده رشد و تولید محصولات کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان از جمله ایران است که وقوع خشکسالی‌های پی‌درپی بر اثر تغییرات اقلیمی شدت آن را افزایش داده است. رشد، عملکرد، پایداری غشا، محتوای رنگیزه‌ها، روابط آب، تنظیم اسمزی و فعالیت فتوسنتزی تحت تأثیر کم‌آبی قرار می‌گیرند (پرابا و همکاران ۲۰۰۹). تولید گونه‌های اکسیژن فعال (ROS) یکی از اولین پاسخ‌های بیوشیمیایی سلول‌ها به تنش خشکی است. تنش خشکی موجب افزایش گونه‌های فعال اکسیژن شده و به آسیب اکسیداتیو در پروتئین‌ها، DNA و لیپیدها منجر می‌گردد (اپل و هیرت ۲۰۰۴). این اثرات منجر به کاهش رشد و تولید در تعدادی از گونه‌های گیاهی می‌شوند (عبدالجلال و همکاران ۲۰۰۹). توانایی گیاهان برای سازش به تنش‌های محیطی به نوع، شدت تنش، گونه گیاهی و مرحله رشد گیاه بستگی دارد. عدم دسترسی به آب کافی در مراحل حساس رشد گیاه مانند رویشی، گلدهی یا میوه‌بندی موجب کاهش قابل توجهی در عملکرد گیاه می‌شود (کافی و همکاران ۱۳۹۳). درصد پوشش سبز زمین، محتوای کلروفیل، وزن اندام‌های گیاهی (برگ‌ها و ساقه‌ها، گل‌ها و دانه‌ها) و محصول بذر در شرایط تنش خشکی شدید کاهش یافتند ولی درصد اسانس اندام‌های مختلف گیاه شویید (*Anethum graveolens*) با افزایش کمبود آب تا تنش متوسط افزایش یافتند (قاسمی گل‌عدانی و صلحی خواجه‌مرجان ۲۰۲۱).

پلی‌آمین‌ها (PA) گروهی از متابولیت‌های نیتروژنی با وزن مولکولی کم می‌باشند که در همه سلول‌های گیاه وجود دارند (چایلدز و همکاران ۲۰۰۳)، به طوری از پلی‌کاتیون‌های مهم محسوب می‌شوند و در القای تقسیم سلولی، جنین زایی، ریخت زایی، نمو گل، میوه و دانه و تأخیر در پیری سلول مؤثر هستند (لیو و همکاران ۲۰۰۶). کاربرد خارجی پلی‌آمین‌ها موجب تقسیم و توسعه سلول‌ها می‌شوند که می‌توانند به عنوان یک منبع نیتروژن‌دار عمل کرده و از این طریق رشد و نمو را

تحریک کنند (ماهروس و همکاران ۲۰۱۱). محلول‌پاشی این تنظیم‌کننده‌ها، به ویژه پوترسین، برای کاهش مشکلات کم‌آبی در گیاهان زراعی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (حسین و همکاران ۲۰۱۳). بالا رفتن فعالیت آنزیم آرچنین دکربوکسیلاز در شرایط کم‌آبی سبب بالا رفتن تولید و تجمع پوترسین در اغلب گیاهان می‌شود. کاربرد پوترسین در بابونه آلمانی (*Chamomilla Matricaria* L.) تحت خشکی با تحریک فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان سبب القای تحمل خشکی گردیده است (نظری و همکاران ۲۰۱۵). محلول‌پاشی پلی‌آمین‌ها تحت تنش خشکی در گیاه جعفری مکزیکی (*minuta* L. *Tagetes*) سبب افزایش محتوای نسبی آب، رنگیزه‌های فتوسنتزی و کاهش نشت الکترولیت‌ها شده است (آراسته و همکاران ۲۰۲۰). پوترسین از تولید آنزیم‌های لازم برای سنتز اتیلن نیز جلوگیری کرده و موجب تأخیر در پیری گیاه و افزایش طول دوره مؤثر پر شدن دانه‌ها و محصول دانه گردیده است. استفاده از پوترسین موجب افزایش کارایی مصرف آب و تحمل گیاه به تنش‌های غیرزیستی از جمله خشکی شده و سبب افزایش رشد ساقه، پهن شدن برگ و افزایش محصول بذر شده است (شهبازی و اشرف ۲۰۰۷). بنابراین، با توجه به اهمیت کاربرد پلی‌آمین‌ها در بهبود صفات فیزیولوژیکی و عملکرد مزرعه‌ای گیاهان، در این پژوهش اثر محلول‌پاشی پوترسین تحت تنش خشکی روی برخی صفات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی گیاه خردل سیاه مورد ارزیابی قرار گرفته است تا تیمارهای مناسب برای افزایش تحمل تنش خشکی، محصول دانه و روغن آن شناسایی و معرفی شوند.

مواد و روش‌ها

آزمایشی به صورت اسپلایت پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز با ارتفاع ۱۳۶۰ متر از سطح دریای آزاد، در طول جغرافیایی ۴۶ درجه و ۱۷ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۸ درجه و ۳ دقیقه شمالی قرار گرفته است. قبل از اجرای آزمایش، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک تا عمق ۳۰ سانتی‌متری

تعیین و در جدول ۱ درج شده است. آبیاری در چهار سطح (I₁, I₂, I₃ و I₄: به ترتیب آبیاری پس از ۷۰، ۱۰۰، ۱۳۰ و ۱۶۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A به عنوان آبیاری معمول و تنش‌های ملایم، متوسط و شدید کم‌آبی) به کرت‌های اصلی و آب‌پاشی و محلول‌پاشی پوترسین (۵۰ و ۱۰۰ میکرومولار) به کرت‌های فرعی اختصاص یافتند. غلظت پوترسین مورد آزمایش با توجه به ویژگی‌های گیاه و تحقیقات قبلی انتخاب گردیده است. بذرها (رقم محلی مغان) مورد استفاده در این تحقیق از پاکان بذر اصفهان تهیه شدند که دارای جوانه‌زنی ۹۸/۵ درصد و وزن هزار دانه ۵/۱ گرم بودند. پس از انجام تجزیه خاک (جدول ۱) و عملیات خاک‌ورزی شامل شخم، دیسک و تسطیح، کرت‌هایی به ابعاد ۵×۲ متر با

۶ ردیف کاشت ایجاد شدند. فاصله ردیف‌ها ۲۵ سانتی-متر و فاصله بذرها روی ردیف ۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. بذرها بعد از ضدعفونی با بنومیل (به نسبت دو گرم در کیلوگرم بذر) در شیارهایی به عمق ۱/۵ سانتی‌متر کاشته شدند تا تراکم ۸۰ بوته در متر مربع حاصل گردد. بعد از کاشت، کلیه کرت‌های آزمایشی آبیاری شدند و آبیاری‌های بعدی با در نظر گرفتن تیمارهای مورد نظر انجام پذیرفت. پس از استقرار کامل گیاهان، برای رسیدن به تراکم مطلوب بوته‌ها تنک شدند. علف‌های هرز مزرعه به صورت مکرر حذف گردیده و محلول‌پاشی پوترسین در مرحله گلدهی BBCH-scale (stage 64) صورت گرفت.

جدول ۱- نتایج تجزیه خاک قطعه زمین تحت آزمایش

ماده آلی	نیترژن	فسفر	پتاسیم	کربنات کلسیم	pH	هدایت الکتریکی	بافت خاک
۰/۰۸۹	۰/۱۳	۱۱/۶۲ mg.kg ⁻¹	۵۰۲/۲ mg.kg ⁻¹	۱۴/۰۸	۷/۲۴	۰/۷۸ μS.cm ⁻¹	لوم-شنی

اندازه‌گیری‌ها

صفات فیزیولوژیکی

تعیین درصد پوشش سبز در هر کرت، هر هفت روز یک‌بار و در هفت مرحله که اولین مرحله دو هفته بعد از جوانه‌زنی با استفاده از یک چهارچوب به ابعاد ۵۰×۵۰ سانتی‌متر صورت گرفت. سطح داخلی این چهارچوب به وسیله ریسمانی به ۱۰۰ قسمت مساوی تقسیم شده بود و چهار پایه متحرک در گوشه‌های آن وجود داشت. ابتدا محل قرارگیری چهارچوب در هر کرت مشخص گردید و هرگاه حداقل ۵۰ درصد هر خانه با پوشش سبز گیاه پر می‌شد، به عنوان خانه پر و مجموع خانه‌های پر درصد پوشش سبز را مشخص می‌کرد.

اندازه‌گیری صفات فیزیولوژیکی مانند شاخص کلروفیل برگ، محتوای نسبی آب برگ، دمای برگ، کارایی فتوسیستم II و نشت الکترولیت‌ها در مرحله گلدهی انجام شد. ثبت شاخص کلروفیل (ICC) برگ با استفاده از دستگاه کلروفیل‌متر دستی مدل CCM-200 در سه قسمت از هر یک از برگ‌های بالایی، میانی و پایینی سه بوته انجام گرفت. کارایی فتوسیستم II با استفاده از روش ماکسول و همکاران (۲۰۰۰) در حوالی

ساعت ۱۲ ظهر از برگ‌های جوان توسعه یافته سه بوته با استفاده از دستگاه فلورومتر (Chlorophyll II Fluorometer مدل Opti Science OS-30 USA) تعیین گردید.

قبل از انجام آبیاری، در مرحله گلدهی BBCH-scale (stage 64)، چند برگ جوان توسعه یافته از هر کرت انتخاب شدند و محتوای نسبی آب برگ (RWC) به روش پیشنهادی اسمارت و بینگهام (۱۹۷۴) و با استفاده از معادله ۱ محاسبه گردید:

$$RWC = [(FW - DW)/(TW - DW)] \times 100$$

(رابطه ۱)

که در آن: FW: وزن تر برگ، DW: وزن خشک برگ و TW: وزن آماس برگ

از دماسنج مادون قرمز مجهز به پرتو لیزری (Tes 1327) برای تعیین دمای برگ استفاده شد. اندازه‌گیری در مزرعه و بدون تخریب گیاه صورت گرفت. دمای بخش میانی برگ‌های بالایی، وسطی و پایینی سه بوته در هر کرت در ساعت ۱۲-۱۳ بعد از ظهر و قبل از آبیاری اندازه‌گیری شد، میانگین سه عدد حاصل به عنوان دمای برگ در هر کرت ثبت گردید.

اجزای محصول، محصول دانه و شاخص برداشت

موقعی که بیش از ۹۰ درصد نیامها، رنگ زرد مایل به قهوه‌ای به خود گرفتند و رطوبت آنها به حدود ۱۸ درصد رسید، بوته‌های موجود در مساحت یک متر مربع از وسط هر کرت برداشت شدند. در موقع رسیدگی بوته-ها (BBCH-scale stage 89)، ۱۰ بوته از هر واحد آزمایش کف بر شدند و در داخل پاکت به آزمایشگاه منتقل گردیده و تعداد نیام در بوته، تعداد دانه در نیام، تعداد دانه در بوته و وزن هزار دانه و محصول دانه در واحد سطح برای هر تیمار در هر تکرار مشخص شد. سپس این بوته‌ها با کل کاه و دانه در پاکت‌های کاغذی قرار داده شدند و به مدت ۴۸ ساعت در داخل آونی با دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری گردیدند تا خشک شوند. پس از این مدت، وزن دانه‌ها به آن اضافه گردیده و وزن بوته‌ها در واحد سطح تعیین شد. برای تعیین شاخص برداشت دانه از معادله زیر استفاده گردید.

$$\text{شاخص برداشت دانه} = \text{محصول بیولوژیکی} / \text{محصول دانه} \quad (\text{رابطه ۳})$$

تا ۶ ساعت، روغن نمونه‌ها استخراج و در دمای اتاق قرار گرفتند تا حلال تبخیر شود و در نهایت روغن خالص جمع‌آوری گردد. درصد، محصول و شاخص برداشت روغن بر اساس معادله‌های زیر محاسبه گردید (بی‌نام: ۱۹۹۳):

$$100 \times (\text{وزن دانه} / \text{وزن روغن}) = \text{محتوای روغن}$$

$$\text{محصول دانه} \times \text{درصد روغن} = \text{محصول روغن}$$

$$\text{محصول بیولوژیکی} / \text{محصول روغن} = \text{شاخص برداشت روغن}$$

فتوسیستم II، محتوای نسبی آب برگ، دمای برگ و نشت مواد الکترولیت غشا به طور معنی‌داری تحت تأثیر تیمار-های آبیاری و پوترسین قرار گرفتند، ولی اثر متقابل آنها برای این صفات معنی‌دار نبود (جدول ۲).

بیشترین درصد پوشش سبز، کارایی فتوسیستم II و محتوای نسبی آب برگ به تیمار آبیاری معمول تعلق داشت که اختلاف معنی‌داری با تنش کم‌آبی ملایم نداشت، اما این صفات در آبیاری‌های پس از ۱۳۰ و ۱۶۰ میلی‌متر تبخیر افت معنی‌داری پیدا کردند. افزایش فواصل آبیاری

نمونه‌های برگ از هر کرت (۰/۱ گرم) در ۱۰ میلی‌لیتر آب دو بار تقطیر در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ دقیقه نگه داشته شدند. پس از آن که دمای نمونه‌ها به دمای اتاق رسید، هدایت الکتریکی اولیه (C_1) مواد نشت یافته با استفاده از دستگاه EC سنج ثبت شد. سپس نمونه‌ها در ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه قرار گرفتند و پس از انتقال به دمای اتاق، هدایت الکتریکی نهایی (C_2) مواد نشت یافته اندازه‌گیری شد (قاسمی-گلعدانی و همکاران ۲۰۱۶). برای محاسبه آن از معادله ۲ استفاده گردید. در این معادله هرچقدر نشت الکترولیت‌ها بیشتر باشد پایداری غشا کمتر است.

$$\text{MSI} = [(EC_1/EC_2)] \times 100 \quad (\text{رابطه ۲})$$

در این معادله: EC_1 : هدایت الکتریکی نمونه‌ها بعد از ۱۰ نگه‌داری در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد و EC_2 : هدایت الکتریکی نمونه‌ها بعد از ۳۰ دقیقه نگهداری در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد

درصد، محصول و شاخص برداشت روغن

روغن خردل سیاه توسط دستگاه سوکسله استخراج گردید. ابتدا دانه‌ها به خوبی پودر شده و درون کاغذهای فیلتری قرار گرفتند تا پودر با حلال مخلوط نشود. از پترولیوم اتر به عنوان حلال استفاده شد. دمای دستگاه سوکسله در ۷۵ درجه سانتی‌گراد تنظیم گردید. پس از ۴

$$\text{رابطه ۴}$$

$$\text{رابطه ۵}$$

$$\text{رابطه ۶}$$

برای تجزیه و تحلیل آماری از نرم افزار MSTATC و برای رسم نمودارها از برنامه Excel استفاده شد. پس از تجزیه واریانس داده‌ها، مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون LSD انجام شد.

نتایج و بحث**صفات فیزیولوژیکی**

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که درصد پوشش سبز، شاخص کلروفیل برگ، کارایی

معنی دار نبود. افزایش تنش کم آبی تا ۱۰۰ میلی متر تبخیر، نشت مواد الکترولیت را تحت تأثیر قرار نداد. اما آبیاری-های پس از ۱۳۰ و ۱۶۰ میلی متر تبخیر تفاوت معنی داری ایجاد کردند (جدول ۳).

شاخص کلروفیل را در برگ‌های گیاهان خردل سیاه به طور معنی داری کاهش داد، اما تفاوت معنی داری بین تنش ملایم با متوسط و متوسط با شدید مشاهده نگردید. در سطوح مختلف تنش کم آبی دمای برگ نسبت به آبیاری معمول افزایش پیدا کرد، اما این افزایش بین I₁، I₂ و I₃

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر تیمارهای مختلف آبیاری و پوترسین روی برخی صفات فیزیولوژیکی خردل سیاه

میانگین مربعات							منابع تغییر
درجه آزادی	پوشش سبز	شاخص کلروفیل	کارآیی فتوسیستم II	محتوای نسبی آب برگ	دمای برگ	نشت الکترولیت	
تکرار	۲	۷۵/۰۹	۰/۰۱	۷/۶۸	۶/۳۱	۲۲۰/۹۵	
آبیاری (I)	۳	۱۸۵/۰۱**	۰/۱۴**	۲۶۵/۶۶**	۵۵/۸۸**	۳۳۴/۱۴**	
خطای اصلی	۶	۵/۴۳	۰/۰۰۲	۲۶/۶۱	۵/۰۴	۱۶/۵۲	
پوترسین (Pu)	۲	۱۰۵/۹۴**	۰/۰۰۹**	۱۰۲/۰۶**	۷/۷۵**	۲۳۵۴/۳۱**	
I × Pu	۶	۴/۶۲	۰/۰۰۱	۱۷/۶۷	۰/۱۴	۱۱/۷۳	
خطای فرعی	۱۶	۴/۰۸	۰/۰۰۱	۶/۵۱	۰/۶۳	۴۰/۹۳	
ضریب تغییرات (%)	-	۵/۶۲	۴/۰۲	۲/۳۳	۵/۵۹	۱۲/۸۵	

** معنی دار در سطح احتمال ۱٪ می باشد.

کاهش کارآیی فتوسیستم II تحت تنش خشکی در این آزمایش به دلیل اختلال در ساخت کلروفیل بوده است (جدول ۳). زیرا کارآیی فتوسیستم II به طور مستقیم به فعالیت کلروفیل در مرکز واکنش ارتباط دارد و کاهش آن می تواند مربوط به کاهش دسترسی به آب و آسیب فتوسیستم II باشد. این عمل در مرکز واکنش کوئینون A اتفاق می افتد و منجر به کاهش انتقال الکترون در فتوسیستم II می گردد (شریف و همکاران ۲۰۱۸). کاهش محتوای نسبی آب برگ‌ها سبب کاهش هدایت روزنه‌ای و انتقال دی‌اکسید کربن به داخل برگ می شود که این عامل موجب افت فتوسنتز و افزایش دمای برگ می شود. اختلاف در محتوای نسبی آب برگ‌ها در مرحله تنش ممکن است از تفاوت کثرت دیواره‌های سلولی در این شرایط ناشی شده باشد (سرت و همکاران ۲۰۱۸). بنابراین، کاهش محتوای نسبی آب برگ‌ها موجب کاهش شاخص کلروفیل، کارآیی فتوسیستم II، افزایش دمای برگ‌های گیاه و افزایش نشت الکترولیت شده و از این طریق رشد گیاه را تحت تأثیر قرار داده است (جدول ۳). غشای سلول از نخستین اندام‌هایی است که تحت تنش

کاهش سطح سبز گیاهان تحت تنش خشکی نتیجه رقابت آن‌ها برای جذب آب و مواد مغذی است (قاسمی گلعدانی و همکاران ۲۰۱۰). تنش خشکی سبب کاهش آماس سلولی و رشد گیاهان شده و بنابراین منجر به کاهش سطح برگ (آنجوم و همکاران ۲۰۱۱) و پوشش سبز گیاهی (قاسمی گلعدانی و افخمی ۲۰۱۸) می شود. غلظت کلروفیل در گیاهان یکی از عوامل مهم حفظ ظرفیت فتوسنتزی است. کلروفیل مرکز تبدیل انرژی نورانی به شیمیایی در گیاه است. در صورت قرار گرفتن گیاه تحت کمبود آب فتوسنتز دچار اختلال می شود (داس و راما ۱۳۸۸). به نظر می رسد که دلیل کاهش میزان کلروفیل در شرایط کم آبی، تخریب رنگیزه‌ها، کاهش سنتز آن‌ها و اختلال در فعالیت آنزیم‌های مسئول ساخت رنگیزه‌های فتوسنتزی باشد (نظربگی و همکاران ۲۰۱۱). اشرف و همکاران (۲۰۱۹) گزارش کردند که کاهش غلظت کلروفیل تحت تنش به واسطه فعالیت آنزیم‌های کلروفیل‌از و پراکسیداز و ترکیبات فنلی است که در نتیجه منجر به تجزیه کلروفیل و کاهش مقدار آن در کلروپلاست می شود. با توجه به نتایج حاصل می توان استنباط کرد که

محلول‌پاشی پوترسین با غلظت‌های ۵۰ و ۱۰۰ میکرومولار به طور معنی‌داری درصد پوشش سبز و محتوای نسبی آب برگ را بهبود بخشید و اختلاف معنی‌داری بین دو غلظت پوترسین وجود نداشت. کاربرد ۵۰ میکرومولار پوترسین به صورت معنی‌داری منجر به افزایش محتوای کلروفیل برگ و کارایی فتوسیستم II گردید، اما بین آب‌پاشی و محلول‌پاشی ۱۰۰ میکرومولار پوترسین تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد (جدول ۳). دمای برگ و نشت الکترولیت‌ها از غشا با استفاده از پوترسین به صورت معنی‌داری کاهش پیدا کردند که بین محلول‌پاشی ۵۰ و ۱۰۰ میکرومولار پوترسین تفاوت معنی‌داری وجود نداشت (جدول ۳).

آسیب می‌بیند. آسیب ناشی از گونه‌های اکسیژن فعال منجر به پراکسیداسیون لیپیدهای غشا می‌گردد. این امر بر عملکرد طبیعی سلول اثر می‌گذارد و منجر به افزایش آسیب اکسیداتیو می‌شود (مینا و همکاران ۲۰۱۶). افزایش نشت مواد الکترولیت در نتیجه تنش کم‌آبی می‌تواند مرتبط با کاهش محتوای نسبی آب برگ و افزایش دمای برگ باشد (جدول ۳). به طور کلی با کاهش رطوبت خاک میزان نشت یونی از برگ‌ها افزایش می‌یابد، چرا که کمبود آب با آسیب به غشای سلولی موجب تخریب غشا، تغییر در نفوذپذیری و در نهایت افزایش نشت مواد الکترولیت می‌شود (جونگلانگ و همکاران ۲۰۱۵).

جدول ۳- میانگین برخی صفات فیزیولوژیکی خردل سیاه تحت تیمارهای مختلف آبیاری و محلول‌پاشی پوترسین

تیمار	پوشش سبز (%)	شاخص کلروفیل	کارایی فتوسیستم II	محتوای نسبی آب برگ (%)	دمای برگ °C	نشت الکترولیت
آبیاری (I)						
I ₁	۷۴/±۲۲	۴۱/۷۰ ±۱/۷۷a	۰/۸۰ ±۰/۹۰a	۸۰/۹۰ ±۰/۹۴a	۱۰/۹۱ ±۰/۴۴b	۴۲/۳۹ ±۴/۲۸c
I ₂	۶۶/۸۹ ±۱/۴۴a	۳۷/۱۸ ±۱/۳۰b	۰/۷۷ ±۰/۰۱a	۷۹/۷۳ ±۰/۷۷a	۱۳/۷۶ ±۰/۶۷ab	۴۸/۳۰ ±۴/۹۹b
I ₃	۵۳/±۳۳	۳۳/۶۹ ±۱/۰۹bc	۰/۶۳ ±۰/۰۲b	۷۶/۹۲ ±۰/۶۶ab	۱۵/۴۷ ±۱/۱۵a	۵۱/۵۰ ±۴/۳۳ab
I ₄	۵۱/۷۸ ±۲/۳۱b	۳۱/۲۶ ±۰/۳۴c	۰/۵۲ ±۰/۰۲c	۶۸/۸۵ ±۲/۷۲b	۱۶/۶۵ ±۰/۳۷a	۵۶/۹۶ ±۴/۵۴a
پوترسین (Pu)						
Pu ₀	۵۶/۰۸ ±۳/۹۷b	۳۳/۱۴ ±۱/۳۱b	۰/۶۵ ±۰/۰۲b	۷۳/۳۵ ±۲/۲۶b	۱۵/۰۸ ±۱/۱۱a	۶۵/۲۷ ±۲/۸۱a
Pu ₁	۶۳/۱۷ ±۳/۷۲a	۳۹/۰۶ ±۱/۶۷a	۰/۷۰ ±۰/۰۳a	۷۹/۰۰ ±۰/۹۵a	۱۳/۵۱ ±۰/۷۴b	۴۶/۱۱ ±۲/۴۶b
Pu ₂	۶۵/۴۲ ±۳/۹۹a	۳۵/۶۸ ±۱/۳۲b	۰/۶۹ ±۰/۰۳ab	۷۷/۴۵ ±۱/۶۴a	۱۴/۰۱ ±۰/۷۸ab	۳۷/۹۹ ±۱/۷۸b

I₁, I₂, I₃ و I₄: به ترتیب آبیاری پس از ۷۰، ۱۰۰، ۱۳۰ و ۱۶۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A

Pu₀, Pu₁ و Pu₂: به ترتیب آب‌پاشی (شاهد) و محلول‌پاشی ۵۰ و ۱۰۰ میکرومولار پوترسین

حروف متفاوت نمایانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد است.

اکسین، سیتوکینین و آبسیزیک اسید را در گیاهان تغییر می‌دهد و رشد و عملکرد آن‌ها را در شرایط آبی معمول و محدود افزایش می‌دهد (مینوچا و همکاران ۲۰۱۴). افزایش محتوای کلروفیل با محلول‌پاشی پوترسین ممکن است با بالا رفتن جذب نیتروژن مرتبط باشد. چرا که در دسترس بودن نیتروژن می‌تواند محتوای کلروفیل و در نتیجه فتوسنتز را افزایش دهد (ماهروز و همکاران ۲۰۱۱). استفاده از پوترسین سبب القای داخلی سیتوکینین و در نتیجه تحریک بیوسنتز کلروفیل و تمایز کلروپلاست

نیتروژن یکی از عناصر ضروری برای رشد گیاه محسوب می‌شود، بنابراین پوترسین به عنوان یک منبع نیتروژن عمل کرده و به این طریق رشد رویشی و درصد پوشش سبز را افزایش می‌دهد (ماهروز و همکاران ۲۰۱۱). افزون بر این، پوترسین با دخالت در تقسیم و بزرگ شدن سلول موجب افزایش تعداد برگ و رشد گیاه می‌شود (ال-کونسی و همکاران ۲۰۱۰). اثر مثبت پوترسین بر رشد نیز می‌تواند با تأثیر آن بر سایر هورمون‌های محرک رشد گیاهی باشد. پوترسین تعادل

فعالیت پروتئاز و سنتز اتیلن در فرآیند پیری شوند که این امر منجر به کاهش پراکسیداسیون لیپیدهای غشا می‌گردد (آلکازار و همکاران ۲۰۰۶). قاسمی گل‌عذانی و همکاران (۲۰۱۸) نیز گزارش کردند که پوترسین از طریق حذف رادیکال‌های آزاد، کاهش مالون‌دی‌آلدهید و افزایش محتوای نسبی آب برگ و یکپارچگی غشا سبب کاهش نشت الکترولیت در کلزا (*Brassica napus L.*) می‌شود.

اجزای محصول

تیمارهای آبیاری و پوترسین روی طول نیام، تعداد نیام در بوته و وزن هزار دانه اثر معنی‌داری داشتند. تعداد دانه در نیام و تعداد دانه در بوته فقط تحت تأثیر محلول‌پاشی پوترسین قرار گرفتند (جدول ۴). تحت تنش شدید نیام‌ها کمترین طول را به خود اختصاص دادند و در آبیاری معمول بیشترین تعداد نیام و وزن هزاردانه حاصل شد که اختلاف معنی‌داری با تنش ملایم نداشتند. گرچه با افزایش فواصل آبیاری تعداد نیام در بوته و وزن هزاردانه کاهش یافتند، اما این صفات تحت تیمارهای I₂ و I₃ و همچنین I₃ و I₄ از لحاظ آماری مشابه بودند (جدول ۵).

می‌گردد (ال-باسیونی و همکاران ۲۰۰۸). کاربرد پوترسین منجر به حفظ پایداری غشای کلروپلاست و مانع تجزیه کلروفیل شده و با افزایش رشد گیاه سبب بهبود درصد پوشش سبز می‌شود (جدول ۳). سطوح داخلی پلی‌آمین‌ها با محلول‌پاشی خارجی افزایش می‌یابد که منجر به افزایش کارایی فتوسیستم II از طریق افزایش یکپارچگی غشا می‌گردد (شو و همکاران ۲۰۱۵). همچنین گزارش شده است که پوترسین از طریق تحریک سنتز ATP، انرژی سلول را تأمین کرده و ظرفیت فتوسنتزی با افزایش کارایی فتوسیستم II و مرکز واکنش فعال بهبود می‌یابد (زانگ و همکاران ۲۰۰۹). نظری و همکاران (۲۰۱۵) دریافتند که پلی‌آمین‌ها منجر به افزایش محتوای نسبی آب و کاهش دمای برگ در گیاه بابونه آلمانی می‌شود. حفظ محتوای آب برگ در نتیجه کاربرد پوترسین را می‌توان با بهبود محتوای پوترسین آزاد و ویژگی‌های یکپارچگی غشا توجیه کرد (قاسمی گل‌عذانی و همکاران ۲۰۱۸). پوترسین با بهبود محتوای نسبی آب برگ‌ها سبب افزایش کارایی فتوسیستم II شده و دمای برگ و نشت الکترولیت را کاهش می‌دهد و به افزایش رشد گیاه منجر می‌شود (جدول ۳). پوترسین ممکن است مانع از

جدول ۴- تجزیه واریانس اثر تیمارهای مختلف آبیاری و پوترسین روی اجزای محصول خردل سیاه

میانگین مربعات					درجه آزادی	منابع تغییر
وزن هزار دانه	تعداد دانه در بوته	تعداد دانه در نیام	تعداد نیام در بوته	طول نیام		
۲/۹۶	۴۲۵/۳۵	۴/۸۷	۱۲/۷۶	۴/۴۸	۲	تکرار
۹/۵۹**	۳۱۳/۶۰	۲/۴۷	۷۰۶/۲۰**	۴۰/۲۲**	۳	آبیاری (I)
۰/۲۷	۳۴۳/۱۸	۱/۵۱	۳۹/۴۳	۱/۵۴	۶	خطای اصلی
۵/۵۹**	۳۲۹/۵۶**	۰/۹۹*	۱۱۷/۱۰**	۱۳/۰۲**	۲	پوترسین (Pu)
۰/۱۰	۲۱۸/۰۹	۰/۰۸	۹/۸۰	۱/۰۷	۶	I × Pu
۰/۱۷	۱۰۳/۱۲	۰/۲۵	۳/۹۱	۰/۹۶	۱۶	خطای فرعی
۴/۹۲	۶/۵۸	۱۷/۴۲	۵/۳۱	۲/۴۰	-	ضریب تغییرات (%)

** معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ می‌باشد.

خشکی (جدول ۵) به افت محصول دانه در واحد سطح منجر شده است (جدول ۶). بر اساس گزارش معصومی و همکاران (۲۰۱۱) ریزش گل‌ها بر اثر تنش کم‌آبی دلیل

کاهش طول نیام می‌تواند از کاهش درصد پوشش سبز، محتوای نسبی آب و کلروفیل برگ (جدول ۳) در شرایط تنش ناشی شده باشد. کاهش تعداد نیام در بوته بر اثر

پوترسین با غلظت ۵۰ میکرومولار بیشترین اثر افزایشی را در طول نیام و تعداد دانه در بوته ایجاد کرد که اختلاف معنی‌داری بین محلول‌پاشی ۵۰ با ۱۰۰ میکرومولار و غلظت ۱۰۰ میکرومولار با آب‌پاشی مشاهده نگردید. کاربرد پوترسین در هر دو غلظت منجر به افزایش تعداد نیام در بوته، تعداد دانه در بوته و وزن هزار دانه گردید (جدول ۵). پوترسین از طریق بهبود صفات فیزیولوژیکی (جدول ۳) اجزای محصول را افزایش داد (جدول ۵).

اصلی کاهش تعداد نیام در بوته می‌باشد. تحت تنش کم-آبی تولید مواد فتوسنتزی کاهش یافته و افزایش رقابت درون بوته‌ای ناشی از آن منجر به ریزش گل‌ها و کاهش تعداد نیام می‌گردد. کم‌آبی در طول پرشدن دانه می‌تواند از طریق افزایش سنتز اتیلن و پیری زودرس منجر به کاهش دوره پرشدن و انتقال مواد فتوسنتزی به دانه‌ها گردد که سبب کاهش وزن دانه‌ها می‌شود (آواستی و همکاران ۲۰۱۴). سهگال و همکاران (۲۰۱۸) دریافته‌اند که کاهش وزن دانه‌ها تحت تنش با کاهش جذب آب و عناصر غذایی، محتوای کلروفیل، انتقال مواد فتوسنتزی و دوره پر شدن دانه در ارتباط می‌باشد.

جدول ۵- میانگین اجزای محصول خردل سیاه تحت تیمارهای مختلف آبیاری و محلول‌پاشی پوترسین

تیمار	طول نیام (mm)	تعداد نیام در بوته	تعداد دانه در نیام	تعداد دانه در بوته	وزن هزار دانه (g)
آبیاری (I)					
I ₁	۴۳/۱۶ ± ۰/۸۰a	۵۱/۱۲ ± ۲/۴۷a	۳/۸۶ ± ۰/۰۹a	۱۴۸/۰۷ ± ۶/۵۰a	۹/۶۲ ± ۰/۲۳a
I ₂	۴۱/۷۸ ± ۱/۲۹ab	۴۵/۷۸ ± ۱/۹۱ab	۳/۴۶ ± ۰/۰۸a	۱۵۷/۹۲ ± ۱/۷۵a	۸/۸۷ ± ۰/۳۱ab
I ₃	۴۰/۴۶ ± ۱/۲۶b	۳۸/۴۷ ± ۱/۶۵bc	۴/۲۰ ± ۰/۱۴a	۱۴۰/۲۸ ± ۴/۹۹a	۸/۰۳ ± ۰/۳۶bc
I ₄	۳۸/۱۹ ± ۲/۰۷c	۳۱/۵۳ ± ۱/۹۹c	۳/۴۹ ± ۰/۱۹a	۱۶۵/۷۵ ± ۳/۷۰a	۷/۲۳ ± ۰/۲۹c
پوترسین (Pu)					
Pu ₀	۳۹/۸۶ ± ۲/۶۹b	۳۸/۳۸ ± ۱/۸۰b	۲/۶۳ ± ۰/۱۲b	۹۶/۴۳ ± ۷/۵۳b	۷/۷۱ ± ۰/۲۸b
Pu ₁	۴۱/۹۴ ± ۱/۸۱a	۴۲/±۵۴ ۲/۴۰a	۳/۲۰ ± ۰/۱۴a	۱۳۳/۲۰ ± ۴/۵۹a	۸/±۵۳ ۰/۲۷a
Pu ₂	۴۰/۸۸ ± ۱/۹۸ab	۴۴/۳۷ ± ۱/۸۱a	۲/۸۲ ± ۰/۱۷ ab	۱۲۱/۹ ± ۵/۵۱a	۹/۰۷ ± ۰/۳۳a

I₁, I₂, I₃ و I₄: به ترتیب آبیاری پس از ۷۰، ۱۰۰، ۱۳۰ و ۱۶۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A

Pu₀, Pu₁ و Pu₂: به ترتیب آب‌پاشی (شاهد) و محلول‌پاشی ۵۰ و ۱۰۰ میکرومولار پوترسین

حروف متفاوت نمایانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد است.

نتیجه کاربرد پوترسین می‌تواند مربوط به بهبود محتوای نسبی آب برگ، کلروفیل (جدول ۳) و در نتیجه تأمین عناصر غذایی و کاهش تعداد نیام‌های پوچ باشد. پوترسین می‌تواند سرعت فتوسنتز و متابولیسم کربوهیدرات را بهبود بخشد (کریمی ۲۰۱۶) که در نهایت منجر به افزایش دانه در بوته می‌شود. عمادی و همکاران (۲۰۱۳) دریافته‌اند که پوترسین بر تعدادی از فرآیندهای گیاهی از جمله تنظیم روزنه، محتوای کلروفیل و فتوسنتز اثر دارد. کاربرد پوترسین سرعت و دوره پرشدن دانه را افزایش داده و منجر به تولید دانه‌های بزرگ می‌شود.

کاربرد پوترسین منجر به افزایش تولید هورمون‌های محرک رشد مانند اکسین و سیتوکنین می‌گردد. با افزایش این هورمون‌ها در گیاه، تقسیم سلولی و طول شدن سلول‌ها اتفاق می‌افتد که در نهایت طول نیام افزایش می‌یابد (مینوچا و همکاران ۲۰۱۴). افزایش تعداد نیام در بوته با کاربرد پوترسین می‌تواند مربوط به افزایش جذب عناصر غذایی، کاهش رقابت بین بوته‌ای، افزایش سطح سبز گیاهی (جدول ۳)، کاهش ریزش گل‌ها، افزایش تولید مواد فتوسنتزی و طولانی شدن دوره گلدهی باشد (جوزان و همکاران ۲۰۱۳). افزایش تعداد دانه در نیام در

متقابل آبیاری \times پوترسین برای این صفت معنی‌دار نشد (جدول ۶). وزن بوته و محصول دانه با افزایش فواصل آبیاری کاهش یافتند. بیشترین وزن بوته و محصول دانه تحت آبیاری معمول به دست آمد که تفاوت معنی‌داری با تنش ملایم نداشت. بین تنش‌های متوسط و شدید نیز تفاوت معنی‌داری از این لحاظ مشاهده نگردید. درصد و محصول روغن با افزایش فواصل آبیاری کاهش یافتند و بین تنش‌های I_3 و I_4 با آبیاری معمول اختلاف معنی‌داری وجود داشت (جدول ۷).

پوترسین با تحریک سنتز فیتوهورمون‌هایی مانند اکسین و جیبرلین ممکن است منجر به افزایش وزن دانه گردد (حسین و همکاران ۲۰۱۱).

وزن بوته، محصول و شاخص برداشت دانه و روغن
بر اساس نتایج مندرج در جدول ۶، اثر آبیاری و پوترسین روی وزن بوته، محصول دانه و محتوای روغن خردل سیاه معنی‌دار بود اما اثر متقابل تیمارهای مورد آزمایش برای این صفات معنی‌دار نبود (جدول ۶). سطوح پوترسین اثر معنی‌داری بر شاخص برداشت دانه و روغن خردل سیاه داشت، ولی اثر سطوح آبیاری و اثر

جدول ۶- تجزیه واریانس اثر تیمارهای مختلف آبیاری و پوترسین روی وزن بوته، محصول دانه و شاخص برداشت خردل سیاه

میانگین مربعات				درجه آزادی		منابع تغییر
شاخص برداشت روغن	محصول روغن	درصد روغن	شاخص برداشت دانه	محصول دانه	وزن بوته	
۰/۰۱۵	۳۱/۱۷	۱۲/۷۴	۴۵/۶۶	۱۶۹۵/۷۵	۱۶۸۹۵/۲۳	تکرار
۰/۰۱۳	۱۵۸/۰۰**	۲۱/۶۲**	۲/۹۳	۱۸۲۵/۳۱**	۳۵۴۶۷/۶۵**	آبیاری (I)
۰/۰۰۳	۴/۷۰	۰/۹۸	۷/۱۴	۷۷/۶۰	۷۳۶/۵۵	خطای اصلی
۰/۰۳۶**	۱۶۹/۱۳**	۱۱/۶۳*	۳۸/۲۲*	۲۸۰۰/۲۸**	۲۰۳۵۶/۱۴**	پوترسین (Pu)
۰/۰۰۵	۱۰/۵۱	۲/۹۱	۵/۶۰	۶۵/۴۵	۴۴۱/۰۱	$I \times Pu$
۰/۰۰۳	۶/۵۰	۲/۴۶	۵/۲۲	۱۹۸/۰۵	۱۵۳/۱۲	خطای فرعی
۱۱/۳۷	۱۵/۴۱	۷/۵۷	۵/۷۶	۱۷/۸۴	۱۱/۸۸	ضریب تغییرات (%)

** معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ می باشد.

وزن هزار دانه (جدول ۵) و افزایش نشت الکترولیت (جدول ۳) سبب افت محصول دانه گردید. تنش خشکی منجر به کاهش دسترسی گیاه به آب و عناصر غذایی به ویژه نیتروژن، بسته شدن روزنه‌ها، جریان دی‌اکسید کربن به مزوفیل برگ و در نتیجه کاهش انتقال مواد فتوسنتزی می‌گردد (آروی و همکاران ۲۰۱۱). نتایج مشابهی نیز برای گیاه کلزا گزارش گردیده است (مام‌نبی و همکاران ۲۰۲۰). کاهش محصول روغن در نتیجه تنش می‌تواند مربوط به تغییرات ایجاد شده در درصد روغن و محصول دانه باشد (جدول ۷).

کاهش وزن بوته تحت کمبود آب می‌تواند مربوط به کاهش درصد پوشش سبز و کلروفیل (جدول ۳) باشد. کم‌آبی از طریق کاهش توسعه و تقسیم سلولی، شدت فتوسنتز، بسته شدن روزنه‌ها و تخصیص بیشتر مواد به ریشه منجر به کاهش وزن خشک اندام‌های هوایی و وزن بوته می‌شود (پاک‌نژاد و همکاران ۲۰۱۷). کاهش وزن بوته از طریق کاهش سطح برگ در زنیان نیز گزارش گردیده است (قاسمی و همکاران ۲۰۱۹). تنش کم‌آبی با کاهش محتوای نسبی آب برگ، کلروفیل و کارایی فتوسیستم II (جدول ۳)، طول نیام، تعداد نیام در بوته،

جدول ۷- میانگین محصول دانه و روغن خردل سیاه تحت تیمارهای مختلف آبیاری و محلول پاشی پوترسین

تیمار	وزن بوته (g.m ⁻²)	محصول دانه (g.m ⁻²)	شاخص برداشت دانه	درصد روغن	محصول روغن (g.m ⁻²)	شاخص برداشت روغن
آبیاری (I)						
I ₁	۳۹۶/۸ ± ۲۱/۴۵a	۹۵/۱۱ ± ۸/۳۲a	۲۴/۵۷ ± ۰/۹۱a	۲۲/۸۷ ± ۱/۰۸a	۲۱/۸۹ ± ۲/۰۱a	۰/۵۴ ± ۰/۰۲a
I ₂	۳۶۲/۸ ± ۲۴/۰۶a	۸۴/۱۶ ± ۵/۳۳ab	۲۳/۲۵ ± ۰/۵۶a	۲۰/۹۱ ± ۰/۳۲ab	۱۷/۳۸ ± ۰/۷۰b	۰/۴۸ ± ۰/۰۱a
I ₃	۳۰۲/۵ ± ۱۳/۵۵b	۷۴/۷۱ ± ۵/۲۳bc	۲۳/۵۲ ± ۰/۹۴a	۲۰/۰۱ ± ۰/۳۲b	۱۵/۰۱ ± ۱/۰۳bc	۰/۴۸ ± ۰/۰۲a
I ₄	۲۵۵/۶ ± ۱۵/۸۲ b	۶۱/۵۷ ± ۶/۷۰c	۲۳/۶۹ ± ۱/۶۵a	۱۸/۸۸ ± ۱/۴۲b	۱۱/۹۲ ± ۱/۴۲c	۰/۴۵ ± ۰/۰۳a
پوترسین (Pu)						
Pu ₀	۲۸۱/۹ ± ۱۴/۴۱b	۶۱/۳۸ ± ۳/۷۶b	۲۱/۷۲ ± ۰/۵۶b	۱۹/۶۳ ± ۰/۳۴b	۱۲/۳۱ ± ۰/۸۲b	۰/۴۱ ± ۰/۰۱b
Pu ₁	± ۳۵۵ ۲۴/۹۹a	۸۹/۵۱ ± ۷/۶۷a	۲۵/۰۵ ± ۱/۰۳a	۲۰/۷۵ ± ۰/۹۳ab	۱۹/۴۶ ± ۱/۸۱a	۰/۵۳ ± ۰/۰۲a
Pu ₂	۳۵۱/۴ ± ۲۱/۶۵a	۸۵/۷۷ ± ۴/۹۶a	۲۴/۵ ± ۰/۸۴a	۲۱/۶۲ ± ۰/۴۶a	۱۷/۸۸ ± ۴/۹۶a	۰/۴۹ ± ۰/۰۱a

I₁, I₂, I₃ و I₄: به ترتیب آبیاری پس از ۷۰، ۱۰۰، ۱۳۰ و ۱۶۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A

Pu₀, Pu₁ و Pu₂: به ترتیب آب پاشی (شاهد) و محلول پاشی ۵۰ و ۱۰۰ میکرومولار پوترسین

حروف متفاوت نمایانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد است.

میانگین وزن بوته، محصول دانه، شاخص برداشت دانه، درصد، محصول و شاخص برداشت روغن گیاهان بر اثر تیمار غلظت‌های مختلف پوترسین افزایش معنی‌داری پیدا کردند (جدول ۷). پوترسین از طریق بهبود صفات فیزیولوژیکی به‌ویژه کلروفیل (جدول ۳)، موجب افزایش وزن بوته شد. بهبود وزن گیاهان تیمار شده با پوترسین به طور مستقیم با پوشش سطح زمین ارتباط داشت (جدول ۳). پوترسین به عنوان منبع نیتروژن و کربن منجر به افزایش تقسیم و بزرگ شدن سلول و در نهایت افزایش وزن خشک بوته‌ها می‌گردد (هورا و همکاران ۲۰۱۵). محلول پاشی برخی تنظیم‌کننده‌های رشد در غلظت‌های زیاد اثر بازدارندگی داشته و سبب کاهش رشد و عملکرد گیاهان می‌شود (پیراسته انوشه و امام ۲۰۱۸). بیشترین محصول دانه در واحد سطح با کاربرد پوترسین حاصل گردید که با بیشتر شدن درصد پوشش سبز، محتوای کلروفیل، محتوای نسبی آب برگ (جدول ۳)، طول نیام، تعداد نیام در بوته، وزن هزار دانه، تعداد دانه در نیام و تعداد دانه در بوته (جدول ۵) بر اثر این تیمار ارتباط دارد. اثر معمول پوترسین بر محصول دانه ممکن است به دلیل افزایش محصول گل‌آذین و انتقال بیشتر مواد فتوسنتزی به دانه‌ها هنگام پرشدن دانه باشد

(شی و همکاران ۲۰۱۴). جوزون و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند که کاربرد پوترسین منجر به افزایش محتوای نسبی آب برگ، تعداد نیام در بوته، دانه در نیام، دانه در بوته، انتقال مواد فتوسنتزی بیشتر به دانه‌ها و در نهایت محصول دانه گیاه سویا گردید. با توجه به نقش نیتروژن در افزایش رشد و نمو گیاهان، وجود گروه‌های آمین در ساختار پلی‌آمین‌ها می‌تواند در افزایش محصول دانه گیاهان مؤثر باشد (قاسمی‌گل‌عدانی و همکاران ۲۰۱۸). تیمار پوترسین با افزایش محتوای کلروفیل برگ-ها (جدول ۳) موجب طولانی شدن دوره پر شدن دانه‌های گیاه و در نتیجه افزایش انتقال ماده خشک به دانه‌ها شده است. در نتیجه اثر آن بر محصول دانه بیش از وزن بوته (جدول ۷) بوده و شاخص برداشت دانه و روغن را افزایش داده است (جدول ۷). افزایش درصد و محصول روغن دانه با کاربرد پوترسین توسط قاسمی‌گل‌عدانی و همکاران (۲۰۱۸) نیز گزارش گردیده است. آن‌ها نشان دادند که پوترسین با افزایش محتوای کلروفیل و محتوای نسبی آب برگ منجر به افزایش درصد و محصول روغن کلزا گردید. پلی‌آمین‌ها با تأثیر بر اجزای روغن از طریق فعال کردن برخی آنزیم‌های درگیر در متابولیسم

دمای برگ و نشت الکترولیت و بهبود صفات مورفو- فیزیولوژیکی مانند درصد پوشش سبز، محتوای کلروفیل، کارایی فتوسیستم II، محتوای نسبی آب برگ، تعداد نیام در بوته، دانه در نیام، دانه در بوته، وزن هزار دانه، وزن بوته و در نهایت محصول دانه و شاخص برداشت گردید. محلول پاشی پوترسین با غلظت ۵۰ میکرومولار تیمار مناسب برای بهبود عملکرد مزرعه‌ای و تولید روغن خردل سیاه تشخیص داده شد.

سپاسگزاری

بدین وسیله از حمایت‌های دانشگاه تبریز و دانشکده کشاورزی در اجرای این پژوهش تشکر و قدردانی می- نمایم.

اسیدهای چرب منجر به افزایش درصد و محصول روغن می‌گردند (طلعت و ال-دین ۲۰۰۷).

نتیجه‌گیری کلی

محدودیت آب موجب کاهش درصد پوشش سبز، شاخص محتوای کلروفیل، کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II، محتوای نسبی آب برگ، تعداد نیام در بوته، وزن هزار دانه و وزن بوته گردید، اما دمای برگ و نشت الکترولیت غشا را افزایش داد و در نهایت به افت قابل توجه محصول دانه خردل سیاه منجر شد. درصد و محصول روغن دانه نیز تحت تنش خشکی نسبت به آبیاری معمول کاهش یافتند. افت محصول روغن در شرایط تنش با کاهش درصد روغن و محصول دانه در واحد سطح مرتبط بود. کاربرد پوترسین سبب کاهش

منابع مورد استفاده

- Abdul Jaleel C, Manivannan P, Wahid A, Farooq M, Somasundaram R and Panneerselvam R. 2009. Drought stress in plants: a review on morphological characteristics and pigment composition. *International Journal of Agriculture and Biology*, 11: 100-105.
- Alcazar R, Marco F, Cuevas J, Patron M, Ferrando A, Carrasco P, Tiburcio A and Alta-bella T. 2006. Involvement of polyamines in plant response to abiotic stress. *Biotechnology Letters*, 28: 67-76.
- Anjum SA, Xie XY, Wang LC, Saleem MF, Man C and Lei W. 2011. Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. *African Journal of Agricultural Research*, 6: 2026-2032.
- Anonymus. 1993. Official methods and recommended practices. The American Oil Chemists Society, Champaign.
- Apel K and Hirt H. 2004. Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction. *Annual Review of Plant Biology*, 55: 373-399.
- Arasteh F, Moghaddam M, Ghasemi Pirbalouti A. 2020. The effect of putrescine foliar application on the induction of drought resistance in Mexican marigold (*Tagetes minuta* L.). *Journal of Cell and Tissue*, 11: 204-220. (In Persian)
- Arve LE, Torre S, Olsen JE and Tanino K. 2011. Stomatal responses to drought stress and air humidity in a biotic stress in plants mechanisms and adaptations. *Journal Plant Research*, 119: 267-280.
- Ashraf MA, Iqbal M, Rasheed R, Hussain I, Mubarik MS, Arif MS and Riaz M. 2019. Chapter 24 - abiotic stress-induced oxidative stress in rice. In: Hasanuzzaman M., Fujita M., Nahar K., Biswas J.K. (Eds), *Advances in Rice Research for Abiotic Stress Tolerance*. Woodhead Publishing, 489-504.

- Awasthi R, Kaushal N, Vadez V, Turner NC, Berger J and Siddique KH. 2014. Individual and combined effects of transient drought and heat stress on carbon assimilation and seed filling in chickpea. *Journal Functional Plant Biology*, 41: 1148-1167.
- Childs AC, Metha DJ and Gerner EW. 2003. Polyamine dependent gene expression. *Cellular and Molecular Life Science*, 60: 1394-1406.
- Das VY and Rama AS. 2009. Photosynthesis: Adjustment in different light. *Iranian Agricultural Science*, (In Persian).
- El-Bassiouny HM. Mostafa HA. El-Khawas SA. Hassanein RA. Khalil SI and Abd El-Monem AA. 2008. Physiological responses of wheat plant to foliar treatments with arginine or putrescine. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 2: 1390-1403.
- El-Quesni FEM. Mahgoub MH and Kandil MM. 2010. Impact of foliar spray of inorganic fertilizer and bioregulator on vegetative growth and chemical composition of *Syngonium Podophyllum* L. Plant at Nubaria. *Journal of American Science*, 6: 288-294.
- Emadi MS. Hassibi P and Azimi A. 2013. Effect of foliar application of Putrescine and nutrient elements on grain yield and quality of two bread wheat cultivars. *Iranian journal of Crop Sciences*, 15: 260-247. (In Persian)
- Ghassemi S. Zehtab-Salmasi S. Ghassemi-Golezani K and Alizadeh-Salteh S. 2019. Morphological traits and yield of Ajowan affected by different irrigation intervals and growth regulators. *Advances in Horticultural Science*, 33: 97-104.
- Ghassemi-Golezani K and Afkhami N. 2018. Changes in some morpho-physiological traits of safflower in response to water deficit and nano-fertilizers. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*, 12: 391-398.
- Ghassemi-Golezani K. Khomari S. Dalil B. Hosseinzadeh-Mahootchy A and Chadordooz-Jeddi A. 2010. Effects of seed aging on field performance of winter oilseed rape. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 8: 175-178.
- Ghassemi-Golezani K. Mabudi-Bilasvar H and Dabbagh-Mohammadi-Nassab A. 2018. Improving rapeseed (*Brassica napus* L.) plant performance by exogenous salicylic acid and putrescine under gradual water deficit. *Acta Physiologiae Plantarum*, 12: 1-8.
- Ghassemi-Golezani K and Solhi-Khajehmarjan R. 2021. Changes in growth and essential oil content of dill (*Anethum graveolens*) organs under drought stress in response to salicylic acid. *Journal of Plant Physiology and Breeding*, 11: 33-47.
- Hura T. Dziurka M. Hura K. Ostrowska A and Dziurka K. 2015. Free and cell wall-bound polyamines under long-term water stress applied at different growth stages of *Triticosecale* Wittm. *PLoS One*, 10: 135-145.
- Hussain S. Ali M. Ahmad M and Siddique K. 2011. Polyamines: natural and engineered abiotic and biotic stress tolerance in plants. *Biotechnology Advances*, 29: 300-11.
- Hussain S. Farooq M. Wahid MA and Wahid A. 2013. Seed priming with putrescine improves the drought resistance of maize hybrids. *International Journal of Agriculture and Biology*, 15: 1349-1353.
- Ildiko SG. Klara KA. Marianna TM. Agnes B. Zsuzsanna MB and Balint C. 2006. The effect of radio frequency heat treatment on nutritional and colloid chemical properties of different white mustard (*Sinapis alba* L.) varieties. *Innovative Food Science and Emerging Technology*, 7: 74-79.

- Jalili Marandi R. 2010. Physiology of environmental stresses and resistance mechanisms in horticultural plants. 2010. Jihad University Press. West Azerbaijan Branch. (In Persian).
- Jungklang J. Saengnil K and Uthaibutra J. 2015. Effect of water-deficit stress and paclobutrazol on growth, relative water content, electrolyte leakage, proline content and some antioxidant changes in *Curcuma alismatifolia* Gagnep. Cv. Chiang Mai Pink. Saudi Journal of Biological Science, 27: 1-7.
- Juzon K. Czyczyło-Mysza I. Marcin ska I. Dziurka M. Waligo rski P and Skrzypek E. 2017. Polyamines in yellow lupin (*Lupinus luteus* L.) tolerance to soil drought. Acta Physiologiae Plantarum, 39: 1-10.
- Kafi M. Borzoi A. Salehi M. Kamandi A. Masoumi A and Nabati J. 2014. Physiology of environmental stresses in plants. Jihad Daneshgahi. Ferdowsi University of Mashhad. (In Persian)
- Karimi Z. 2016. Putrescine foliar application effect on physiologic and morphologic characteristics of wheat (*Triticum aestivum* var. sw-82-9) under water deficit stress. Biological Forum—An International Journal, 8: 532-539.
- Liu JH. Nada K. Honda C. Kitashiba H. Wen XP. Pang XM and Moriguchi T. 2006. Polyamine biosynthesis of apple callus under salt stress: Importance of arginine decarboxylase pathway in response. Journal of Experimental Botany, 57: 2589-2599.
- Maasomi A. Kafi M. Nezami A and Hosseini SH. 2006. Effects of drought stress on morphological traits in chickpea (*Cicer arietinum* L.) genotypes in greenhouse. Iranian Journal of Field Crops, 3: 277-289. (In Persian).
- Mahros KM. Badawy EM. Mahgoub MH. Habib AM and El-Sayed IM. 2011. Effect of putrescine and uniconazole treatments on flower characters and photosynthetic pigments of *Chrysanthemum indicum* L. American Journal of Plant Science, 7: 399-408.
- Mamnabi S. Nasrollahzadeh S. Ghassemi-Golezani K and Raei Y. 2020. Improving yield-related physiological characteristics of spring rapeseed by integrated fertilizer management under water deficit conditions. Saudi Journal of Biological Sciences, 27: 797-804.
- Maxwell K and Johnson GN. 2000. Chlorophyll fluorescence-a practical guide. Journal of Experimental Botany, 51: 659-668.
- Meena S. Mittal GK. Shivran AC. Singh D. Niyariya R. Gupta NK. Singh B and Saxena SN. 2016. Water stress induced biochemical changes in fenugreek (*Trigonella foenum graecum* L.) genotypes. International Journal Seed Spices, 6: 61-70.
- Minocha R. Majumdar R and Minocha CS. 2014. Polyamines and abiotic stress in plants: a complex relationship. Frontiers in Plant Science, 5: 175-193.
- Mohammad Reza Khajehpour. Industrial plants. 2007. University Jihad. Isfahan University of Technology, (In Persian).
- Nazarli H. Ahmadi A and Hadian J. 2015. Putrescine induces drought tolerance and alters the activities of antioxidant enzymes in growing chamomile plants (*Matricaria chamomilla* L.). Iranian journal of Field Crop Science (Iranian journal of Agricultural Sciences), 46: 222-293. (In Persian)

- Nazarbeygi E, Yazdi HL, Naseri R and Soleimani R. 2011. The effects of different levels of salinity on proline and A, Bchlorophylls in canola. *American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, 10: 70-74.
- Paknejad F, Fatemi Rika Z and Elkaee Dehno M. 2017. Investigation end season drought effect on yield and yield components of ten barley (*Hordeum vulgare* L.) cultivars in Karaj region. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 10: 391-401. (In Persian)
- Pirasteh-Anosheh H and Emam Y. 2018. Improved crop yield using plant growth regulators in saline conditions, theory or reality? The 2nd National Conference on Salinity Stress in Plants and Developing Strategies for Saline Agriculture. Tabriz. Iran. 5-6 Sep. Praba ML. Cairns JE. Babu RC and Lafitte HR. 2009. Identification of physiological traits underlying cultivar differences in drought tolerance in rice and wheat. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 195: 30-46.
- Salahvarzi Y, Tehrani A and Gazanchian A. 2008. Physio-morphological changes under drought stress and rewatering in endemic and exotic turfgrasses. *Iranian journal of Horticultural Science and Technology*, 9: 193-204. (In Persian).
- Sehgal A, Sita K, Kumar J, Kumar S, Singh S and Siddique KHM. 2017. Effects of drought, heat and their interaction on the growth, yield and photosynthetic function of lentil (*Lens culinaris* Medikus) genotypes varying in heat and drought sensitivity. *Front. Plant Science*, 8: 77-87.
- Serret MD, Yousfi S, Vicente R, Pinero MC, Otalora-Alcon G, del Amor FM and Araus JL. 2018. Interactive Effects of CO₂ Concentration and Water Regime on Stable Isotope Signatures, Nitrogen Assimilation and Growth in Sweet Pepper. *Frontiers in Plant Science*, 8: 1-18.
- Shahbaz M and Ashraf M. 2007. Influence of exogenous application of brassinosteroid on growth and mineral nutrients of wheat (*Triticum aestivum* L.) under saline conditions. *Pakistan. Journal Botanic*, 513-522.
- Sharif R, Mujtaba M, Ur Rahman M, Shalmani A, Ahmad H, Anwar T, Tianchan D and Wang X. 2018. The multifunctional role of chitosan in horticultural crops: a review. *Molecules*, 23: 872-892.
- Shi H and Chan Z. 2014. Improvement of plant abiotic stress tolerance through modulation of the polyamine pathway. *Journal of integrative plant biology*, 56: 11-121.
- Shu Sh, Yuan Y, Chen J, Sun J, Zhang W, Tang Y, Zhong M and Guo Sh. 2015. The role of putrescine in the regulation of proteins and fatty acids of thylakoid membranes under salt stress. *Scientific Reports*, 5: 1-16.
- Talaat IM and Gamal el-din KM. 2007. Physiological Effect of Putrescine and Heat Hardening on *Nigella sativa* L. plants. *International Journal of Agriculture and Biology*, 7: 358-362.
- Wanasundara Janitha PD. 2011. Proteins of brassicaceae oilseeds and their potential as a plant protein source. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 51: 635- 677.
- Zhang RH, Li J, Guo SR and Tezuka T. 2009. Effects of exogenous putrescine on gas-exchange characteristics and chlorophyll fluorescence of NaCl-stressed cucumber seedlings. *Photosynthesis Research*, 100: 155-162.