

تأثیر متیل جاسمونات و پتاسیم بر انگیزش مقاومت به سرمازدگی در دانه‌های پسته رقم

کله قوچی

وحید مظفری^{۱*}، هانیه مسعودپور^۲، مژده خلیل پور^۳، احمد تاج‌آبادی پور^۴، مجید اسماعیلی‌زاده^۵

تاریخ ارسال: ۱۴۰۲/۰۱/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۲۳

چکیده

به منظور ارزیابی اثر متیل جاسمونات و پتاسیم بر مقاومت به سرمازدگی دانه‌های پسته، آزمایشی در قالب طرح کاملاً تصادفی به صورت فاکتوریل با سه تکرار در گلخانه انجام شد. تیمارها شامل متیل جاسمونات (۰، ۷۵ و ۱۵۰ میکرومولار)، پتاسیم (۰، ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار از منبع سولفات پتاسیم) و دما (۰، -۲ و -۴ درجه سلسیوس) بودند. نتایج نشان داد، با کاهش دما درصد نشت یونی برگ افزایش یافت، لیکن با کاربرد توأم ۱۵۰ میکرومولار متیل جاسمونات و یک میلی‌مولار پتاسیم، نشت یونی به میزان ۴۸، ۳۶ و ۴۵ درصد به ترتیب در دمای صفر، -۲ و -۴ درجه سلسیوس نسبت به شاهد کاهش یافت. هم‌چنین در دمای -۴ درجه سلسیوس با مصرف توأم ۱۵۰ میکرومولار متیل جاسمونات و یک میلی‌مولار پتاسیم، غلظت پرولین، قندهای محلول و ترکیبات فنلی به ترتیب به میزان ۸۸، ۳۴ و ۳۳ درصد نسبت به دانه‌های شاهد افزایش یافت. هم‌چنین نتایج این آزمایش نشان داد که با کاهش دما، غلظت کارتنوئیدها، محتوای پروتئین‌های محلول و نشاسته کاهش یافت، ولی با مصرف توأم ۱۵۰ میکرومولار متیل جاسمونات و یک میلی‌مولار پتاسیم، مقدار این پارامترها به ترتیب ۹۵، ۸۶ و ۴۹ درصد نسبت به شاهد در دمای -۴ درجه سلسیوس افزایش یافت. بر اساس نتایج به دست آمده از این پژوهش، مشخص گردید که در شرایط تنش سرمایی، مصرف توأم متیل جاسمونات و پتاسیم از طریق بهبود پارامترهای فتوسنتزی و تنظیم‌کننده‌های اسمزی، می‌تواند باعث کاهش اثرات سرمازدگی دانه‌های پسته گردد.

واژه‌های کلیدی: پرولین، ترکیبات فنلی، شاخص کلروفیل فلورسانس، نشت یونی

^۱ استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولیعصر رفسنجان، رفسنجان، ایران.

*نویسنده مسئول: mozafari@vru.ac.ir

^۲ دانش‌آموخته ارشد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولیعصر رفسنجان، رفسنجان، ایران.^۳ دانش‌آموخته دکتری گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولیعصر رفسنجان، رفسنجان، ایران.^۴ استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولیعصر رفسنجان، رفسنجان، ایران.^۵ دانشیار گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولیعصر رفسنجان، رفسنجان، ایران.

مقدمه

پسته (*Pistacia vera* L.) درختی خزان‌دار است و ظهور برگ آن بسته به رقم، تقریباً هم‌زمان با گل‌دهی می‌باشد. این مرحله معمولاً در اواخر اسفند تا اوایل اردیبهشت رخ داده و در صورت وقوع سرما، این محصول خسارت فراوانی را متحمل می‌شود. زمانیکه دمای هوا به زیر آستانه تحمل گیاه می‌رسد پدیده سرمازدگی اتفاق می‌افتد. در پدیده سرمازدگی یک سری تغییرات بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی اتفاق می‌افتد که در نتیجه آن عملکرد سلول‌های گیاهی مختل می‌شود. در واقع این خسارت منجر به خروج آب درون سلولی شده و در نتیجه آن دیواره سلولی آسیب می‌بیند. این دمای آستانه در مورد پسته چهار درجه سلسیوس و کم‌تر از آن می‌باشد (Taiz & Zeiger, 2002).

در میان رقم‌های مختلف پسته، ارقام زودگل مانند رقم کله‌قوچی بیش‌تر در معرض خطر سرمای بهاره و خسارات ناشی از آن قرار می‌گیرند. یکی از روش‌های افزایش تحمل به سرما و یخ‌زدگی در گیاهان، استفاده از تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی از قبیل جاسمونیک اسید می‌باشد که عامل مهمی در القاء واکنش‌های حمایتی گیاه در برابر تنش سرما می‌باشد (Li *et al.*, 2021). جاسمونات‌ها به خوبی به عنوان هورمون‌های دفاعی شناخته شده‌اند که از گیاهان در برابر حمله عوامل بیماری‌زا و گیاه‌خواری حشرات محافظت می‌کنند و همچنین سبب فعال کردن مکانیسم‌های دفاعی گیاه در

برابر تنش‌های محیطی مختلف از جمله سرما می‌شود (Ding *et al.*, 2023). اخیراً مشخص شده است که جاسمونات‌ها تحمل به سرما را در گیاهان و میوه‌ها از طریق بیوسنتز پلی آمین‌ها افزایش می‌دهد (Raza *et al.*, 2023).

جاسمونات‌ها به عنوان هورمون‌های ضد تنش عمل کرده و در انتقال سیگنال‌های درون سلولی تأثیر زیادی دارند (Khezri *et al.*, 2020). این مواد فرآورده نهایی اکسیداسیون اسیدهای چرب غیراشباع مانند اسید لینولئیک می‌باشد که به صورت مولکول‌های سیگنالی، سیستم‌های دفاعی گیاهان را در برابر عوامل تنش‌زای محیطی فعال می‌کند (Christie & Harwood, 2020). این تنظیم‌کننده‌ی رشد در بسیاری از موارد شبیه به اسید آبسزیک عمل می‌کند و سبب کاهش خسارت سرمازدگی در گیاهان می‌شود (Khezri *et al.*, 2020). ارتباط بین کوددهی و تحمل به سرما در گیاهان تا حدودی پیچیده است. تغذیه گیاهی مشتمل بر شماری از عنصرهای مختلف است که هر کدام از راه‌های مختلف می‌توانند روی تحمل به سرمای گیاه تأثیر بگذارند. کاربرد متعادل برخی عنصرهای غذایی ضمن افزایش ذخیره‌های کربوهیدراتی، باعث بهبود تحمل به دماهای پایین در گیاه نیز می‌شود (Marschner, 2011). پتاسیم فراوان‌ترین کاتیون معدنی در گیاهان است که نقش کلیدی در بسیاری از جنبه‌های سوخت و سازی گیاه دارد (Johnson *et al.*, 2022). به طور معمول یک راهکار خاص در زمان

یونی در درختان پسته رقم کله‌قوچی شد و در نتیجه مقاومت به سرمازدگی را افزایش داد. در ایران بیش از ۷۰ رقم پسته وجود دارد که عمده‌ترین ارقام زیر کشت شامل رقم اکبری، کله‌قوچی، احمدآقایی و اوحدی می‌باشد. در این پژوهش برهم‌کنش تیمارهای متیل‌جاسمونات و پتاسیم در شرایط دمایی متفاوت بر دانه‌های پسته رقم کله‌قوچی برای کاهش میزان سرمازدگی مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

به منظور ارزیابی اثر متیل‌جاسمونات، پتاسیم و تیمار دما (سرما) و هم‌چنین برهم‌کنش آنها بر دانه‌های پسته رقم کله‌قوچی، آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانه دانشگاه ولی‌عصر رفسنجان انجام گرفت. تیمارها شامل متیل‌جاسمونات (۰، ۷۵ و ۱۵۰ میکرومولار)، پتاسیم (۰، ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار از منبع سولفات پتاسیم) و دما (۰، ۲- و ۴- درجه‌ی سلسیوس) بود. با توجه به طول دوره‌ی رشد دانه‌های پسته و احتمال اینکه نیاز ابتدایی این دانه‌ها به عنصر پتاسیم قبل از اعمال تیمارها توسط خاک تامین گردد، از محیط کشت پرلیت استفاده شد. بذرهای پسته (رقم کله‌قوچی) از پژوهشکده پسته تهیه و پس از جوانه زدن در گلدان‌های پلاستیکی که از پرلیت پر شده بود در عمق دو سانتی‌متری کشت گردید. آبیاری دانه‌ها تا هفته‌ی چهارم بعد از کشت با آب مقطر و از هفته‌ی چهارم به بعد با محلول هوگلند تصحیح شده

مواجه شدن گیاه با انواع تنش‌های غیر زنده محیطی و افزایش مقاومت نسبت به تنش‌ها، افزایش جذب پتاسیم در گیاه می‌باشد (Marschner, 2011). پتاسیم با تنظیم سوخت و ساز، رشد گیاه را تقویت و از این طریق گیاه را در برابر انواع تنش‌ها محافظت می‌نماید. به عنوان مثال پتاسیم موجب تنظیم باز و بسته شدن روزنه‌ها و کاهش تعرق و از این طریق موجب افزایش مقاومت گیاه به تنش خشکی می‌شود (Johnson *et al.*, 2022). مطالعات بیان‌گر نقش مثبت پتاسیم در افزایش مقاومت گیاه به تنش سرما می‌باشد. به‌صورتی که تامین پتاسیم در مقادیر زیاد موجب محافظت از غشاءها در برابر تنش اکسیداتیو ناشی از تنش یخ زدگی می‌شود. به عبارتی پتاسیم با تاثیر بر عملکرد غشای پلاسمایی و دیواره سلولی به طور غیر مستقیم مقاومت به سرمای گیاه را افزایش می‌دهد (Trong, 2022). پتاسیم نقش اساسی در فعال‌سازی آنزیم، سنتز پروتئین، فتوسنتز، تنظیم اسمزی، حرکت روزنه، انتقال انرژی، انتقال آبکش، تعادل کاتیون-آنیون و مقاومت در برابر تنش‌ها دارد (Wang *et al.*, 2013). اثر مثبت محلول‌پاشی پتاسیم در افزایش مقاومت به سرمازدگی در گیاهان گوجه‌فرنگی گزارش شده است (Donderalp & Dursun, 2022). محلول‌پاشی پتاسیم از طریق افزایش برخی از ترکیبات اسمولیت و فعالیت آنتی‌اکسیدانی در برگ زیتون باعث بهبود تحمل به سرما شد (Saadati *et al.*, 2021). خادمی و همکاران (۱۳۹۴) گزارش کردند که مصرف پتاسیم موجب کاهش نشت

انجام گرفت (جدول ۱ و ۲)، اعمال تیمار پتاسیم نیز بر اساس محلول هوگلند تصحیح شده انجام شد. زمانی که دانه‌ها به مرحله‌ی شش تا هشت برگگی رسیدند، گلدان‌های تحت تیمار در دو نوبت و با فاصله‌ی سه روز با متیل جاسمونات محلول‌پاشی گردیدند. سپس سه روز بعد از محلول‌پاشی دوم، دانه‌ها جهت سرمادهی داخل اتاقک رشد قرار گرفتند (برای تیمار شاهد از آب مقطر استفاده شد). پس از گذشت ۷۲ ساعت از اتمام محلول‌پاشی دوم، دانه‌ها جهت سرمازدگی در دماهای صفر، ۲- و ۴- درجه سلسیوس قرار گرفتند. بدین منظور ابتدا دانه‌ها با آب مقطر اسپری و سپس داخل دستگاه اتاقک رشد قرار گرفتند. دمای اتاقک رشد با سرعت انجماد ۱۰ درجه سلسیوس در ساعت تا دو درجه سلسیوس خنک شده سپس با سرعت انجماد پنج درجه سلسیوس در ساعت تا دمای ذکر شده ادامه داشت (مظفری و یزدان‌پناه، ۱۳۹۸). نمونه‌ها در دماهای مورد نظر (صفر، ۲- و ۴-) به مدت سه ساعت نگهداری شدند (مظفری و جعفری، ۱۴۰۲). سپس تعدادی برگ از هر بوته جدا و برای اندازه‌گیری پارامترها به آزمایشگاه منتقل شد.

جدول ۱- غلظت محلول نهایی عناصر پرمصرف در تیمارهای مختلف پتاسیم بر حسب میلی‌مولار.

تیمارهای پتاسیم			نام ترکیب
۰	۰/۵	۱	
۱	۱	۱	NH ₄ H ₂ PO ₄
۱	۱	۱	Ca(NO ₃) ₂ .4H ₂ O
۱	۰/۵	-	K ₂ SO ₄
۰/۵	۰/۵	۰/۵	MgSO ₄ .7H ₂ O
۰/۱	۰/۱	۰/۱	NaCl

جدول ۲- غلظت محلول نهایی عناصر کم‌مصرف در محلول هوگلند تصحیح شده بر حسب میکرومولار.

غلظت محلول نهایی		نام ترکیب
۱۲/۰۶		MnSO ₄ .H ₂ O
۰/۶۴		CuSO ₄ .5H ₂ O
۱۲/۲۹۰		H ₃ BO ₃
۱/۵۳۰		ZnSO ₄ .7H ₂ O
۰/۰۳۲		(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄
۱/۲۸۵		Fe-EDTA

اندازه‌گیری درصد نشت یونی

به منظور تعیین پایداری غشای سلولی در برگ، از اندازه‌گیری میزان نشت الکتروولت آن‌ها استفاده شد. بدین‌منظور، شش عدد دیسک برگگی به قطر ۰/۵ سانتی‌متر از برگ‌های بالغ تهیه و بلافاصله دو بار با آب مقطر شستشو و سپس به درون ظروف درب‌دار شیشه‌ای حاوی ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر استریل منتقل شدند. سپس نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای آزمایشگاه روی شیکر قرار داده شدند و قابلیت هدایت الکتریکی اولیه نمونه‌ها اندازه‌گیری شد (Lt). در مرحله بعد ظروف حاوی دیسک‌های برگگی به مدت ۲۰ دقیقه در اتوکلاو با دمای ۱۲۱ درجه سلسیوس قرار داده شدند و پس از سرد شدن در دمای اتاق، قابلیت هدایت الکتریکی ثانویه نمونه‌ها اندازه‌گیری گردید (Lo). در نهایت درصد نشت الکتروولت از غشاها بر اساس رابطه زیر محاسبه شد (Lutts et al., 1996).

$$\text{درصد نشت الکتروولت غشاء} = (Lt/Lo) \times 100$$

اندازه‌گیری کلروفیل کل و کارتنوئیدها

اندازه‌گیری میزان کلروفیل کل و کارتنوئیدها در پایان دوره آزمایش با استفاده از روش اسپکتروفتومتری انجام شد (Lichtenthaler, 1987). از برگ‌های بالغ و میانی گیاه، نمونه‌هایی برای قرائت رنگیزه‌ها تهیه شد. مقدار ۰/۲۵ گرم از نمونه برگ تازه تهیه شده در هاون چینی از پیش سرد شده با ۱۰ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد بر روی یخ سائیده شد تا به‌صورت محلول یکنواختی

درآمد. سپس نمونه‌ها به لوله‌های فالكون ۱۰ میلی‌لیتری منتقل و به‌مدت ۱۵ دقیقه با سرعت ۵۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شدند. پس از جداسازی فاز مایع از جامد، قسمت مایع برای قرائت کلروفیل استفاده شد. در نهایت با استفاده از فرمول‌های زیر میزان کلروفیل کل و کارتنوئیدها بر حسب میلی‌گرم بر گرم وزن تر نمونه محاسبه شد:

$$\begin{aligned} Chla &= \{12.25 (A663.2) - 2.79 (A646.8)\} \times \\ &V/1000 \times W \\ Chlb &= \{25.51(A646.8) - 5.10 (A663.2)\} \times \\ &V/1000 \times W \\ ChT &= Chlb + Chla \\ 1000 (A470) - 1.8 (chla) - 85.02 (chlb) \\ Car &= [1/198] \end{aligned}$$

A: جذب نور در طول موج‌های ۶۶۳/۲، ۶۴۶/۸ و ۴۷۰
V: حجم استون مصرف شده
W: وزن تر نمونه (گرم)

اندازه‌گیری فلورسانس کلروفیل و شاخص کارایی

(PI) دستگاه فتوسنتز

بدین‌منظور از هر گیاه بسته به تعداد برگ‌های سالم دو تا چهار برگ بالغ از قسمت‌های مرکزی گیاه انتخاب و به مدت ۲۰ دقیقه جهت سازگاری به تاریکی به وسیله گیره‌های مخصوص از تابش نور محافظت و نسبت فلورسانس کلروفیل متغیر به فلورسانس کلروفیل حداکثر (Fv/Fm) و همچنین شاخص کارایی دستگاه فتوسنتز توسط دستگاه فلورسانس کلروفیل متر (PEA, Hansatech Instruments Ltd., UK) اندازه‌گیری شد.

اندازه‌گیری پرولین

برای استخراج پرولین، ۰/۵ گرم نمونه تازه برگ با پنج میلی‌لیتر اتانول ۹۵ درصد در هاون چینی کوبیده شد. سپس محلول حاصل را در لوله فالكون ریخته و عمل استخراج دوبار و هر بار با پنج میلی‌لیتر اتانول ۷۰ درصد تکرار گردید. محلول به دست آمده به مدت ۱۰ دقیقه با دور ۳۵۰۰ سانتریفیوژ شد. پس از جداسازی فاز مایع از جامد، قسمت مایع برای استخراج پرولین مورد استفاده قرار گرفت. برای تعیین غلظت پرولین یک میلی‌لیتر از عصاره الکلی فوق را با ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر رقیق و پنج میلی‌لیتر معرف ناین‌هیدرین (مخلوط ۱/۲۵ گرم ناین‌هیدرین در ۳۰ میلی‌لیتر اسیداستیک گلاسیال و ۲۰ میلی‌لیتر اسید فسفریک شش مولار) و پنج میلی‌لیتر اسیداستیک گلاسیال به آن اضافه گردید، سپس این محلول به مدت ۴۵ دقیقه در حمام آب گرم (۹۵ درجه سلسیوس) قرار گرفت. پس از خارج کردن نمونه‌ها از حمام آب گرم و خنک کردن آنها، ۱۰ میلی‌لیتر بنزن به آن‌ها اضافه و با همزن مکانیکی مخلوط گردید تا پرولین وارد فاز بنزن شود. نمونه‌ها ۳۰ دقیقه به حال سکون رها شده، سپس میزان جذب با اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۱۵ نانومتر اندازه‌گیری شد. استانداردهای پرولین نیز با استفاده از ال‌پرولین در غلظت‌های صفر، ۳۱/۲۵، ۶۲/۵، ۱۲۵، ۲۵۰ و ۵۰۰ (میلی‌گرم در لیتر) تهیه و جذب آن‌ها اندازه‌گیری شد (Paquin and Lechasseur, 1979).

اندازه‌گیری قندهای محلول

برای اندازه‌گیری قندهای محلول، ۰/۱ میلی‌لیتر از عصاره الکلی که قبلاً برای اندازه‌گیری پرولین تهیه شده بود با سه میلی‌لیتر از آنترون تازه تهیه شده (۲۰۰ میلی‌گرم آنترون به علاوه ۱۰۰ میلی‌لیتر اسید سولفوریک ۷۲ درصد) مخلوط و به مدت ۱۰ دقیقه در حمام آب گرم جوش قرار داده شد تا واکنش انجام و رنگی شود. پس از خنک شدن، میزان جذب آن با اسپکتروفتومتر در طول موج ۶۲۵ نانومتر قرائت و مقدار قندهای محلول محاسبه گردید. برای تهیه استاندارد قندها از گلوکز خالص در غلظت‌های صفر، ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۵۰، ۱۰۰۰، ۱۲۵۰، ۱۵۰۰، ۱۷۵۰، ۲۰۰۰، ۲۲۵۰ و ۲۵۰۰ (میلی‌گرم در لیتر) تهیه و جذب آن‌ها اندازه‌گیری گردید (Fahimi Khoyerdi et al., 2016).

اندازه‌گیری ترکیبات فنلی

برای اندازه‌گیری میزان ترکیبات فنلی ۰/۱ گرم از برگ تازه توسعه‌یافته از قسمت میانی ساقه در پنج میلی‌لیتر اتانول ۹۵ درصد سائیده و مخلوط به دست آمده را در لوله‌های آزمایش ریخته و به مدت ۴۸ ساعت در تاریکی نگاه‌داری گردید. سپس یک میلی‌لیتر از محلول رویی برداشت و یک میلی‌لیتر اتانول ۹۵ درصد به آن اضافه گردید و با آب مقطر دوبار تقطیر به حجم پنج میلی‌لیتر رسانیده شد. به محلول آماده شده ۰/۵ میلی‌لیتر معرف فولین ۵۰ درصد و یک میلی‌لیتر کربنات سدیم پنج درصد اضافه گردید که منجر به ایجاد رنگ

استفاده شد. در پایان غلظت پروتئین بر حسب میکروگرم در گرم وزن تر بیان شد.

اندازه‌گیری نشاسته

به منظور تعیین نشاسته، ۲۰۰ میلی گرم از نمونه پودر شده برداشت و یک میلی لیتر آب مقطر به آن اضافه گردید، پس از مرطوب شدن کامل، ۴ میلی لیتر هیدروکسید سدیم پنج مولار به آن اضافه و به مدت یک ساعت به هم زده شد. بعد از به هم زدن نمونه‌ها ۳/۸ میلی لیتر اسید کلریدریک پنج مولار اضافه و حجم محلول با آب مقطر دیونیزه شده به ۱۰ میلی لیتر رسانده شد. در ادامه ۱ میلی لیتر از محلول مذکور با ۳ میلی لیتر آب مقطر رقیق گردید. ۱۲۰ میکرولیتر از این محلول رقیق شده به لوله آزمایش حاوی ۳/۶۸ میلی لیتر بافر فسفات سدیم اضافه شد (pH محلول باید خنثی باشد). به لوله آزمایش ۰/۲ میلی لیتر معرف ید اضافه و ورتکس شد. پس از ۱۰ دقیقه، مقدار جذب نور در طول موج ۶۰۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت گردید. سپس با توجه به مقدار جذب نوری محلول‌های استاندارد، مقدار نشاسته موجود در نمونه‌ها محاسبه گردید (Sene et al., 1997). برای تهیه استانداردها از نشاسته استفاده شد که در غلظت‌های صفر، ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم در لیتر تهیه و اندازه‌گیری شد. در نهایت با استفاده از رسم منحنی استاندارد، غلظت نشاسته بر حسب میلی‌گرم بر گرم وزن خشک برگ به دست آمد.

سیاه در نمونه‌ها شد. لوله‌ها به مدت یک ساعت در تاریکی نگهداری و برای قرائت جذب توسط دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۷۲۵ نانومتر آماده گردید. برای رسم منحنی استاندارد از غلظت‌های صفر، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر اسید گالیک استفاده شد (Karimi et al., 2020).

اندازه‌گیری پروتئین‌های محلول

برای اندازه‌گیری پروتئین‌های محلول به لوله‌های آزمایش مقدار ۱۰۰ میکرولیتر عصاره پروتئینی و پنج میلی لیتر معرف بیوره افزوده و بلافاصله ورتکس شد. پس از ۳۰ دقیقه جذب آن‌ها با دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۹۵ نانومتر قرائت شد و غلظت پروتئین‌ها با استفاده از منحنی استاندارد محاسبه شد (Bradford, 1976). اساس روش برادفورد بر تشکیل کمپلکس بین رنگ آبی کوماسی بریلیانت بلو G250 و پروتئین‌های موجود در محلول استوار است. برای تهیه معرف بیوره، ۰/۱ گرم کوماسی بریلیانت بلو G250 در ۵۰ میلی لیتر اتانول ۹۵ درصد به مدت یک ساعت حل و سپس ۱۰۰ میلی لیتر اسید فسفریک ۸۵ درصد قطره قطره به آن افزوده شد. در پایان حجم کل محلول به کمک آب مقطر به یک لیتر رسانده شده و محلول حاصل با کاغذ صافی واتمن شماره یک صاف شد. برای تهیه استاندارد از ماده آلبومین سرم گاوی (BSA) با غلظت‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ (میلی‌گرم در لیتر)

نتایج و بحث

کلروفیل کل، کارتنوئیدها، فلورسانس کلروفیل (Fv/Fm)، شاخص کارایی دستگاه فتوسنتز (PI)، غلظت پرولین، محتوای قندهای محلول، ترکیبات فنلی، پروتئین‌های محلول و نشاسته معنی‌دار است (جدول ۳ و ۴).

نتایج تجزیه واریانس داده‌های حاصل از آزمایش نشان داد که برهم‌کنش تیمارهای متیل جاسمونات، پتاسیم و دما بر برخی از پارامترهای فتوسنتزی دانهال‌های پسته رقم کله‌قوچی مانند نشت یونی،

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس اثر متیل جاسمونات، پتاسیم و دما بر برخی از پارامترهای فتوسنتزی دانهال‌های پسته رقم کله‌قوچی

میانگین مربعات				صفات		
PI	Fv/Fm	کارتنوئیدها	کلروفیل کل	نشت یونی	درجه آزادی	منبع تغییرات
۰/۴ ^{ns}	۰/۰۰۰۱ ^{ns}	۰/۱۶ ^{**}	۲/۴۹ ^{**}	۸۷۱/۶۷ ^{**}	۲	متیل جاسمونات (MG)
۷۹/۹۷ ^{**}	۰/۰۰۰۹ [*]	۰/۰۵ ^{**}	۰/۳۴ ^{**}	۳۰۹/۸۴ ^{**}	۲	پتاسیم (K)
۳۶/۱۲ ^{**}	۰/۰۰۳۱ ^{**}	۰/۰۲ ^{**}	۲/۰۸ ^{**}	۸۹۰/۷۶ ^{**}	۲	دما (T)
۸/۱۷ ^{**}	۰/۰۰۰۲ ^{ns}	۰/۱۸ ^{**}	۰/۰۱ ^{**}	۲۲/۴۹ ^{**}	۴	MG×K
۶/۳۸ ^{**}	۰/۰۰۰۴ ^{ns}	۰/۰۳۶ ^{**}	۰/۵۱ ^{**}	۱۸/۹۲ ^{**}	۴	MG×T
۹/۶۷ ^{**}	۰/۰۰۰۱ ^{ns}	۰/۰۳۹ ^{**}	۰/۰۰۱ ^{ns}	۱۸/۱۹ ^{**}	۴	K×T
۸/۷۵ ^{**}	۰/۰۰۰۲ ^{ns}	۰/۰۷۸ ^{**}	۰/۰۱۲ ^{**}	۳۳/۰۶ ^{**}	۸	MG×K×T
۰/۰۶	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۴	۳/۳۲	۵۴	خطای کل
۱۱/۴۸	۱/۸۱	۷/۶	۲/۶۴	۴/۸۵		ضریب تغییرات (%)

ns، ** و * به ترتیب معنی‌دار در سطح ۰/۰۵، ۰/۰۱ و غیر معنی‌دار

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس اثر متیل جاسمونات، پتاسیم و دما بر برخی از پارامترهای فیزیولوژیکی دانهال‌های پسته رقم کله‌قوچی

میانگین مربعات				صفات		
نشاسته	پروتئین‌های محلول	ترکیبات فنلی	قندهای محلول	پرولین	درجه آزادی	منبع تغییرات
۶۵۳۳ ^{**}	۰/۰۰۰۳ ^{**}	۸۵۷/۱۷ ^{ns}	۳۱۶۱۸۱ ^{**}	۱۵۶۶/۶۹ ^{**}	۲	متیل جاسمونات (MG)
۱۵۱۸ ^{**}	۰/۰۰۰۴ ^{**}	۱۳۵۶۶/۷۴ ^{**}	۳۲۱۸۰ ^{**}	۱۰۳۲/۷۷ ^{**}	۲	پتاسیم (K)
۲۴۳۸ ^{**}	۰/۰۰۰۴ ^{**}	۷۱۴۷۶/۵۱ ^{**}	۱۱۰۳۵۹۴ ^{**}	۲۶۱۷/۶۸ ^{**}	۲	دما (T)
۴۳/۶۰ ^{**}	۰/۰۰۰۰۲ ^{**}	۱۲۵۳/۱۷ ^{**}	۷۶۹/۴۲ ^{**}	۱۰۱/۷۸ ^{**}	۴	MG×K
۱۹۸۰ ^{**}	۰/۰۰۰۱ ^{**}	۷۷۸۳/۸۴ ^{**}	۱۸۴۶۰ ^{**}	۸۳/۶۶ ^{**}	۴	MG×T
۲۵۷/۸۸ ^{**}	۰/۰۰۰۱ ^{**}	۳۰۱/۲۳ ^{ns}	۱۳۶/۴۱ ^{ns}	۱۷/۱۴ ^{**}	۴	K×T
۸۸/۸۴ ^{**}	۰/۰۰۰۰۱ [*]	۲۸۶۹/۲۲ [*]	۱۵۱۵/۳۹ ^{**}	۱۲/۷۳ ^{**}	۸	MG×K×T
۱۰/۰۸	۰/۰۰۰۰۰۲	۱۰۳۶/۸	۱۱۸/۸	۳/۰۲	۵۴	خطای کل
۴/۹۸	۲/۲۸	۸/۹۳	۴/۳۲	۳/۴۷		ضریب تغییرات (%)

ns، ** و * به ترتیب معنی‌دار در سطح ۰/۰۵، ۰/۰۱ و غیر معنی‌دار

همان‌گونه که در جدول مقایسه میانگین‌ها مشاهده می‌شود (جدول ۵)، کاهش دما از صفر به ۴ درجه سلسیوس موجب افزایش معنی‌دار در میزان نشت یونی برگ در تیمار شاهد شد. به گونه‌ای که بیش‌ترین درصد نشت یونی در دمای ۴- و کم‌ترین آن در دمای صفر درجه سلسیوس رخ داد. بدین صورت که با کاهش دما به ۲- و ۴- درجه‌ی سلسیوس، درصد نشت یونی برگ

دانه‌های تیمار شاهد به ترتیب با افزایش ۱۷ و ۶۳ درصدی مواجه شدند، در حالی‌که با کاربرد متیل‌جاسمونات و پتاسیم، به‌ویژه در غلظت‌های ۱۵۰ میکرومولار متیل‌جاسمونات و نیم میلی‌مولار پتاسیم، نشت یونی فقط به ترتیب ۱۴ و ۳۷ درصد افزایش پیدا کرد. به عبارت دیگر، نزدیک به ۵۰ درصد از نشت یونی جلوگیری به‌عمل آمد.

جدول ۵- مقایسه میانگین برهمکنش اثر متیل‌جاسمونات و پتاسیم بر مقدار نشت یونی (درصد) برگ دانه‌های پسته در شرایط تنش سرمایی

تنش سرمایی (°C)			پتاسیم (میلی‌مولار)	متیل‌جاسمونات (میکرومولار)
-۴	-۲	۰		
۶۰/۷ ^a	۴۳/۷ ^{cd}	۳۷/۳ ^{hi}	۰	۰
۴۶/۷ ^b	۴۰/۷ ^{d-g}	۳۶/۷ ^{ijk}	۰/۵	۰
۴۵/۳ ^{bc}	۳۹/۵ ^{gh}	۳۶/۵ ^{ij}	۱	۰
۴۴/۳ ^{bc}	۴۰/۷ ^{d-g}	۳۵/۴ ^{i-l}	۰	۷۵
۴۳/۴ ^{c-e}	۳۸/۰ ^{d-i}	۳۲/۹ ^{k-n}	۰/۵	۷۵
۴۰/۴ ^{fg}	۳۵/۷ ^{i-k}	۳۲/۲ ^{m-n}	۱	۷۵
۴۲/۶ ^{c-f}	۳۲/۷ ^{l-n}	۳۴/۳ ^{j-m}	۰	۱۵۰
۳۷/۳ ^{h-j}	۳۰/۶ ^{no}	۲۶/۹ ^p	۰/۵	۱۵۰
۳۳/۱ ^{k-n}	۲۸/۰ ^{op}	۱۹/۳ ^q	۱	۱۵۰

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ردیف یا ستون در سطح ۵ درصد آزمون دانکن، تفاوت معنی‌داری ندارند.

تنش سرما سبب تحریک تولید پراکسید هیدروژن و دیگر گونه‌های فعال اکسیژن در ساختارهای سلولی می‌شود که در نتیجه باعث پراکسیداسیون لیپیدها و دیگر خسارت‌های اکسیداتیو در سلول شده و در نهایت منجر به کاهش استحکام سلولی و افزایش نشت یونی می‌گردد (Dreyer & Dietz, 2018).

گیاهان محلول‌پاشی شده با متیل‌جاسمونات از نشت یونی کمتری در مقایسه با گیاهان تیمار نشده برخوردار بودند که می‌تواند بیانگر تاثیر این ماده بر روی بهبود وضعیت غشاهای سلولی در برابر آسیب گونه‌های فعال اکسیژن باشد. بنابراین احتمالاً کاربرد متیل‌جاسمونات از طریق افزایش فعالیت آنزیم‌های

مؤثری دارد. افزایش مقاومت به سرمازدگی در اثر استفاده از پتاسیم در انگور (Slavcheva, 2004) و گیاهان زینتی و زراعی (Matysiak & Bielenin, 2005) گزارش شده است.

محتوای کلروفیل کل

بر اساس نتایج مقایسه میانگین‌ها که با استفاده از آزمون دانکن انجام شد (جدول ۶)، گرچه با افزایش پتاسیم هم در شرایط غیر تنش هم در شرایط تنش سرما، محتوای کلروفیل کل با افزایش معنی‌داری روبه‌رو شد، ولی این افزایش در شرایط تنش سرما مخصوصاً در دمای ۴- درجه سلسیوس بسیار چشم‌گیرتر بود به طوری که مقدار کلروفیل کل از ۰/۲۴ به ۱/۷۳ میلی‌گرم بر گرم وزن تر رسید.

در رابطه با تأثیر متیل‌جاسمونات بر محتوای کلروفیل کل که در جدول ۶ نشان داده شده است، اثر کاربرد این تیمار در شرایط عدم مصرف پتاسیم در دمای صفر و ۲- درجه سلسیوس در مقایسه با کاربرد پتاسیم به تنهایی کم‌تر مشاهده شد، لیکن در دمای ۴- درجه سلسیوس اثر کاربرد متیل‌جاسمونات در مقایسه با کاربرد پتاسیم به تنهایی در افزایش محتوای کلروفیل کل برگ بیش‌تر بود. با این‌حال بیش‌ترین مقدار کلروفیل کل هنگامی بدست آمد که مصرف توأم پتاسیم (یک میلی‌مولار) و متیل‌جاسمونات (۱۵۰ میکرومولار) بر روی دانه‌های پسته انجام گردید.

آنتی‌اکسیدان و در نتیجه کاهش گونه‌های فعال اکسیژن باعث کاهش اثرات مخرب تنش سرما شده و از این طریق باعث کاهش نشت یونی در تیمارهای مربوطه شده است (Asghari & Hasanlooe, 2016; Li *et al.*, 2019).

همچنین با توجه به جدول ۳، کمترین نشت یونی در تیمار ۱۵۰ میکرومولار متیل‌جاسمونات محقق شد که حاکی از توانایی این تنظیم‌کننده رشد در افزایش انسجام و پایداری غشاء و در نتیجه کاهش نشت الکترولیت از این ساختارهای زیستی است. متیل‌جاسمونات به‌عنوان نابودکننده رادیکال‌های آزاد در سلول‌های زنده استفاده می‌شود. کاهش خسارت غشاء در اثر کاربرد متیل‌جاسمونات به‌عنوان راهی برای افزایش مقاومت به انواع تنش‌ها در گیاهان شناخته شده است و به‌طور معنی‌داری نشت یونی و تجمع یون‌های سمی را در گیاهان کاهش می‌دهد و همچنین سبب حفظ غشای سلول می‌شود (Ulloa-Inostroza *et al.*, 2024).

گیاه آثار مخرب تنش را با افزایش متابولیسم و تنظیم پتانسیل اسمزی از طریق تجمع مواد معدنی به ویژه یون پتاسیم در سلول‌های خود کاهش می‌دهد و فشار تورژسانس سلول خود را تنظیم می‌کند. همچنین این عنصر به دلیل سنتز آنزیم‌های خنثی‌کننده پراکسید اکسیژن و هیدروژن‌فعالی که در گیاهان هنگام مواجه شدن با دماهای یخ‌زدگی القا می‌شوند از آسیب سلولی جلوگیری می‌کند (Tavakol *et al.*, 2022) و در مقاومت در برابر عوامل نامساعد محیطی مثل سرما نقش نقش

جدول ۶- مقایسه میانگین برهمکنش اثر متیل جاسمونات و پتاسیم بر غلظت کلروفیل کل (میلی گرم در گرم وزن تر) دانه‌های پسته در شرایط تنش سرمایی

	تنش سرمایی (°C)		پتاسیم (میلی مولار)	متیل جاسمونات (میکرومولار)
	-4	-2		
	۰/۲۴ ⁱ	۱/۷۱ ^m	۲/۰۸ ^{fg}	۰
	۱/۶۸ ^m	۱/۸۳ ^l	۲/۱۳ ^{d-f}	۰/۵
	۱/۷۳ ^m	۱/۹۷ ^{hi}	۲/۱۸ ^d	۱
	۱/۵۴ ⁿ	۱/۸۴ ^l	۲/۱۱ ^{ef}	۰
	۱/۷۴ ^m	۱/۹۱ ^{j-l}	۲/۱۹ ^{cd}	۰/۵
	۱/۸۶ ^{j-l}	۱/۰۴ ^g	۲/۲۷ ^b	۱
	۱/۸۷ ^{kl}	۱/۹۲ ^{ij}	۲/۱۵ ^{d-f}	۰
	۱/۹۶ ^{hi}	۲/۰۹ ^{fg}	۲/۲۵ ^c	۰/۵
	۲/۰۲ ^{gh}	۲/۱۵ ^{d-f}	۲/۵۰ ^a	۱

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ردیف یا ستون در سطح ۵ درصد آزمون دانکن، تفاوت معنی‌داری ندارند.

کلروفیل می‌شود (Chavoushi *et al.*, 2019). برخی از محققان نشان داده‌اند که در حضور نور و با استفاده از متیل جاسمونات سنتز کلروفیل تحریک شده و متیل جاسمونات در بیان تعدادی از ژن‌های آنزیم‌های کلیدی در بیوسنتز کلروفیل، از طریق تشکیل آمینولولینیک اسید دخالت دارد (Salavati *et al.*, 2021). همچنین ممکن است متیل جاسمونات به‌عنوان یک الیسیاتور موجب تحریک سنتز آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در شرایط تنش سرما گردد که این موضوع می‌تواند از تخریب رنگیزه‌های گیاهی در اثر تنش اکسیداتیو جلوگیری کند (Li *et al.*, 2019). پتاسیم از طریق فعال‌سازی آنزیم‌های مسیر سنتز کلروفیل و افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدان‌ها در جلوگیری از تخریب کلروفیل، نقش مؤثری دارد. افزایش غلظت کلروفیل، با مصرف سولفات پتاسیم، قبلاً توسط محققین به اثبات رسیده است (Perry *et al.*, 2011).

کارتنوئیدها

یکی از مهم‌ترین دلایل کاهش کلروفیل گیاهان تحت تنش‌های محیطی، تخریب آن‌ها توسط گونه‌های فعال اکسیژن می‌باشد. علت اصلی تشکیل گونه‌های فعال اکسیژن وجود عدم تعادل بین جذب نور و انجام فتوسنتز بیان شده است. با وجود چنین شرایطی، کاهش دما در حضور نور خطر اکسیداسیون نوری را به علت عدم توان استفاده از نور افزایش می‌دهد (Foyer, 2018). توانایی متیل جاسمونات در کاهش پراکسیداسیون غشا در کلروپلاست، به‌ویژه در ساختارهای غشایی تیلاکوئید، از طریق افزایش فعالیت آنزیم‌های خنثی‌کننده رادیکال‌های آزاد، یکی از سازوکارهای احتمالی کاهش تخریب کلروفیل تحت تنش سرما می‌باشد (Peymaei *et al.*, 2024). کاربرد متیل جاسمونات می‌تواند بیان ژن‌های کدکننده مرتبط با فتوسنتز مانند ریبولوز-۱و۵-بیس فسفات کربوکسیلاز (آنزیم روبیسکو) را افزایش دهد که افزایش ترجمه آنها منجر به افزایش محتوای روبیسکو و

افزایش غلظت کارتنوئید نسبت به دانه‌های تیمار شاهد شد. به عبارتی در تیمار سرمایی ۲- درجه سلسیوس، کاربرد ۱۵۰ میکرومولار متیل جاسمونات، موجب افزایش ۵۴ درصدی غلظت کارتنوئید نسبت به تیمار شاهد گردید و در دمای ۴- درجه سلسیوس غلظت کارتنوئید به میزان ۵۹ درصد افزایش یافت. لیکن این افزایش غلظت به مراتب کم‌تر از مصرف تیمار پتاسیم به تنهایی بود. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیش‌ترین غلظت کارتنوئید مربوط به مصرف توأم ۱۵۰ میکرومولار متیل جاسمونات و یک میلی‌مولار پتاسیم نسبت به تیمار شاهد می‌باشد.

نتایج مقایسه میانگین‌ها (جدول ۷)، نشان داد که در شرایط کاهش دما و عدم مصرف پتاسیم و متیل جاسمونات، مقدار کارتنوئید از ۰/۶ به ۰/۳۹ میلی‌گرم در گرم وزن تر کاهش یافت، در صورتی‌که با مصرف یک میلی‌مولار پتاسیم به تنهایی و در تیمار سرمایی صفر درجه سلسیوس، غلظت کارتنوئید به میزان حدود ۴۲ درصد نسبت به شاهد افزایش حاصل نمود. این درحالی است که با کاهش دما به ۲- و ۴- درجه سلسیوس و مصرف این سطح از پتاسیم، غلظت کارتنوئید به ترتیب بیش از ۶۰ و ۸۴ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت. هم‌چنین مصرف متیل جاسمونات به تنهایی موجب

جدول ۷- مقایسه میانگین برهمکنش اثر متیل جاسمونات و پتاسیم بر غلظت کارتنوئیدها (میلی‌گرم بر گرم وزن تر) دانه‌های پسته در شرایط تنش سرمایی

تنش سرمایی (°C)			پتاسیم (میلی‌مولار)	متیل جاسمونات (میکرومولار)
-۴	-۲	۰		
۰/۳۹ ^h	۰/۴۶ ^h	۰/۶۰ ^{fg}	۰	۰
۰/۳۸ ^h	۰/۵۹ ^g	۰/۶۸ ^{ef}	۰/۵	۰
۰/۷۲ ^{de}	۰/۷۴ ^{de}	۰/۸۵ ^{ab}	۱	۰
۰/۴۴ ^h	۰/۶۲ ^{fg}	۰/۷۳ ^{de}	۰	۷۵
۰/۴۶ ^h	۰/۶۲ ^{fg}	۰/۸۵ ^{ab}	۰/۵	۷۵
۰/۷۴ ^{de}	۰/۷۷ ^{bcd}	۰/۸۵ ^{ab}	۱	۷۵
۰/۶۲ ^{fg}	۰/۷۱ ^{de}	۰/۷۶ ^{cd}	۰	۱۵۰
۰/۶۰ ^g	۰/۷۴ ^{de}	۰/۸۶ ^a	۰/۵	۱۵۰
۰/۷۶ ^{cd}	۰/۸۳ ^{abc}	۰/۹۱ ^a	۱	۱۵۰

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ردیف یا ستون در سطح ۵ درصد آزمون دانکن، تفاوت معنی‌داری ندارند.

فرآیند فتوسنتز، تجمع رنگیزه‌هایی نظیر کارتنوئید و آنتوسیانین را در گیاه و محصول آن افزایش می‌دهند (Capitani et al., 2005). هم‌چنین با تحقیق روی گیاه گلرنگ مشخص شد که حضور متیل جاسمونات باعث

کارتنوئیدها به‌عنوان حامی رنگیزه‌های فتوسنتزی و غیرفتوسنتزی شناخته شده‌اند که انرژی نورانی را مهار می‌کنند. احتمال دارد متیل جاسمونات با افزایش سنتز آنزیم‌ها و هورمون‌های گیاهی و افزایش

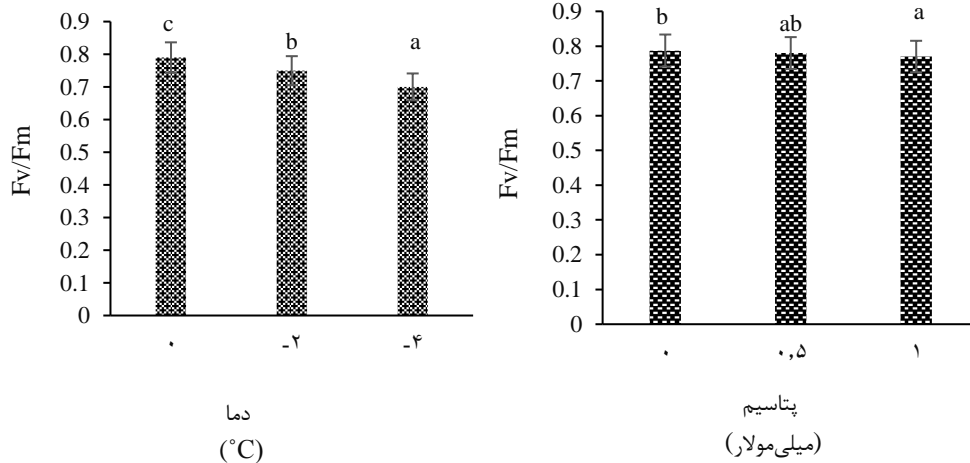
فلورسانس کلروفیل (F_v/F_m)

نتایج مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن نشان می‌دهد، با کاهش دما، نسبت F_v/F_m برگ کاهش یافت به گونه‌ای که بیش‌ترین نسبت F_v/F_m در دمای صفر و کم‌ترین آن در دمای -4 درجه سلسیوس می‌باشد و بدین ترتیب کاهش ۱۱ درصدی را نشان می‌دهد.

همانگونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، با مصرف پتاسیم نسبت F_v/F_m با افزایش معنی‌داری روبه‌رو شد. به گونه‌ای که مصرف یک میلی‌مولار پتاسیم موجب افزایش نسبت F_v/F_m به میزان ۲۳ درصد نسبت به تیمار شاهد گردید.

افزایش رنگیزه‌های فلانئیدی و آنتوسیانیدی در این گیاه می‌شود (Chavoushi *et al.*, 2010). تحقیقات نشان داده است که کاربرد متیل جاسمونات باعث ترمیم و بیوسنتز رنگیزه‌های فتوسنتزی از جمله کلروفیل و کارتنوئیدها می‌شود (Sirhindi *et al.*, 2020).

پتاسیم نیز از راه فعال‌سازی آنزیم‌های مسیر بیوسنتز کلروفیل و هم‌چنین با افزایش دادن فعالیت آنتی‌اکسیدان‌ها در حفاظت از تخریب کلروفیل، نقش مؤثری ایفا می‌کند. پتاسیم قادر به سنتز کارتنوئیدها و لیکوپین در گیاه می‌باشد (Włodarczyk *et al.*, 2023). محققین با مطالعه دو منبع از پتاسیم (سولفات پتاسیم و کلرید پتاسیم) بر گل جعفری گزارش کردند که کاربرد هر دو منبع، موجب افزایش کارتنوئید و کلروفیل گردید (Pal & Ghosh, 2010).



شکل ۱- اثر دما و پتاسیم بر شاخص F_v/F_m دانه‌های پسته

گیاهان حساس به سرما کاهش می‌یابد (Percival & Henderson, 2003). از این رو پتاسیم به وسیله‌ی افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان این رادیکال‌های آزاد را

شاخص فلورسانس کلروفیل یا نسبت F_v/F_m که نشان‌دهنده‌ی بازده فتوسنتز می‌باشد، تحت تأثیر شرایط تنش یخ‌زدگی و سرمای قرار می‌گیرند و مقدار آن در

خنی و در نتیجه افزایش آنزیم روبیسکو و در نهایت در نتیجه افزایش میزان کلروفیل را به همراه داشته و موجب افزایش میزان کلروفیل فلورسانس می‌شود (Hu & Schmidhalter, 2005).

شاخص PI

نتایج حاصل از مقایسه میانگین‌ها در پایان تیمار سرمادهی بر شاخص PI نشان داد (جدول 8) هنگامی که دما از صفر به ۴- درجه سلسیوس کاهش یافت، در شاخص PI تغییر معنی‌داری حاصل نشد. لیکن مصرف یک میلی‌مولار پتاسیم به تنهایی موجب افزایش معنی‌دار شاخص PI در دمای صفر و ۲- درجه سلسیوس به میزان ۶۵ و ۴۸ درصد نسبت به تیمار شاهد در همان دما گردید.

اما تأثیر متیل جاسمونات بر شاخص PI برعکس پتاسیم بود. به عبارت دیگر مصرف ۱۵۰ میکرومولار متیل جاسمونات در دمای صفر، ۲- و ۴- درجه سلسیوس و در شرایط عدم مصرف پتاسیم، موجب کاهش شاخص PI نسبت به تیمار شاهد شد. با این وجود در دمای صفر و ۲- درجه سلسیوس، بیش‌ترین شاخص PI مربوط به مصرف توأم ۱۵۰ میکرومولار متیل جاسمونات و یک میلی‌مولار پتاسیم می‌باشد. لیکن در دمای ۴- درجه سلسیوس بیش‌ترین میزان شاخص PI مربوط به کاربرد توأم ۷۵ میکرومولار متیل جاسمونات و ۰/۵ میلی‌مولار پتاسیم می‌باشد.

جدول ۸- مقایسه میانگین برهمکنش اثر متیل جاسمونات و پتاسیم بر شاخص PI برگ دانه‌های پسته در شرایط تنش سرمایی

تنش سرمایی (درجه سانتیگراد)			پتاسیم (میلی‌مولار)	متیل جاسمونات (میکرومولار)
۴-	۲-	۰		
۴/۱۱ ^{i-k}	۴/۲۰ ^{i-k}	۴/۴۶ ^{h-k}	۰	۰
۴/۸۱ ^{h-j}	۴/۲۷ ^{i-k}	۵/۸۴ ^{d-g}	۰/۵	۰
۵/۰۸ ^{f-i}	۶/۲۳ ^{de}	۷/۳۵ ^{ab}	۱	۰
۳/۸۲ ^{j-l}	۳/۸۰ ^{kl}	۵/۳۴ ^{e-h}	۰	۷۵
۳/۲۸ ^l	۵/۳۶ ^{e-h}	۵/۹۸ ^{d-f}	۰/۵	۷۵
۶/۳۳ ^{c-e}	۶/۴۱ ^{b-d}	۷/۶۳ ^a	۱	۷۵
۳/۹۰ ^{j-k}	۴/۰۹ ^{i-k}	۳/۶۳ ^{kl}	۰	۱۵۰
۴/۹۴ ^{g-i}	۵/۴۳ ^{d-h}	۷/۴۶ ^a	۰/۵	۱۵۰
۴/۸۴ ^{g-j}	۷/۳۶ ^{a-c}	۸/۲۱ ^a	۱	۱۵۰

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ردیف یا ستون در سطح ۵ درصد آزمون دانکن، تفاوت معنی‌داری ندارند.

همان‌گونه که در جدول مقایسه میانگین‌ها مشاهده می‌شود (جدول ۹)، با کاهش دما از صفر به ۴ درجه سلسیوس محتوای پرولین برگ روند افزایشی حدود ۳۰ درصدی را نشان می‌دهد. این درحالی است که

تنظیم‌کننده‌های اسمزی

پرولین برگ

دنبال داشت. با این حال کاربرد ۱۵۰ میکرومولار متیل جاسمونات اختلاف معنی داری نسبت به دانهال‌های شاهد ایجاد کرد و موجب افزایش محتوای پرولین برگ به میزان ۱۶/۵، ۳۴ و ۳۶ درصد به ترتیب در دمای صفر، ۲- و ۴- درجه سلسیوس نسبت به گیاهان شاهد گردید. این در حالی است که بیشترین غلظت پرولین در بالاترین میزان مصرف متیل جاسمونات و پتاسیم به دست آمد و نسبت به شاهد از رشد ۷۵، ۸۱ و ۹۰ درصدی به ترتیب در دمای صفر، ۲- و ۴- درجه سلسیوس برخوردار شد.

با مصرف پتاسیم به تنهایی، دانهال‌ها افزایش معنی داری در محتوای پرولین برگ تجربه کردند. به گونه‌ای که با مصرف یک میلی‌مولار پتاسیم افزایش ۱۶، ۲۱ و ۴۵/۵ درصد این پارامتر نسبت به تیمارهای شاهد به ترتیب در دمای صفر، ۲- و ۴- درجه سلسیوس مشاهده گردید. کاربرد ۷۵ میکرومولار متیل جاسمونات به تنهایی، اختلاف معنی داری در محتوای پرولین برگ در دمای صفر و ۲- درجه سلسیوس ایجاد نکرد. لیکن در دمای ۴ درجه سلسیوس افزایش ۲۵ درصدی این پارامتر را به

جدول ۹- مقایسه میانگین برهمکنش اثر متیل جاسمونات و پتاسیم بر غلظت پرولین (میکروگرم بر گرم وزن تر) برگ دانهال‌های پسته در شرایط تنش سرمایی

تنش سرمایی (°C)			پتاسیم (میلی‌مولار)	متیل جاسمونات (میکرومولار)
-۴	-۲	۰		
۴۱/۵۷ ^l	۳۹/۴۸ ^{lm}	۳۲/۲۳ ^p	۰	۰
۵۴/۹۵ ^{fg}	۴۲/۰۷ ^l	۳۵/۸۰ ^{no}	۰/۵	۰
۶۰/۴۸ ^e	۴۷/۹۱ ^{jk}	۳۷/۵۲ ^{mn}	۱	۰
۵۲/۳۰ ^{ij}	۴۰/۷۷ ^{lm}	۳۳/۱۰ ^{op}	۰	۷۵
۷۹/۵۵ ^f	۴۵/۲۳ ^k	۳۶/۸۰ ^{no}	۰/۵	۷۵
۶۱ ^{de}	۵۲/۵۲ ^{gh}	۴۹/۲۶ ^{ij}	۱	۷۵
۵۶/۴۶ ^f	۵۲/۹۱ ^{gh}	۳۷/۵۵ ^{mn}	۰	۱۵۰
۶۶/۳۷ ^c	۶۳/۳۳ ^{cd}	۴۱ ^a	۰/۵	۱۵۰
۷۹ ^a	۷۱/۶۷ ^b	۵۶/۶۷ ^f	۱	۱۵۰

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ردیف یا ستون در سطح ۵ درصد آزمون دانکن، تفاوت معنی داری ندارند.

افزایشی داشته و بین مقاومت به سرما و افزایش محتوای پرولین در ساقه و برگ لفل، رابطه‌ی مستقیمی وجود داشت (Koc et al., 2010). تحت تنش‌های مختلف از جمله شوری و سرما، کاربرد خارجی متیل جاسمونات سبب القای آنزیم‌های سنتزکننده پرولین و افزایش تولید این اسمولیت و در نتیجه افزایش تحمل به تنش می‌شود

پرولین در واکنش به تنش‌های محیطی در بسیاری از موجودات زنده تجمع می‌یابد و در راستای سازگاری به تنش‌های محیطی چون تنش سرما در گیاهان نقش‌های متعددی ایفا می‌کند (Raza et al., 2023). محققین گزارش کردند، غلظت پرولین در برگ و ساقه‌ی گیاهان لفل تحت شرایط تنش سرما، روند

(Peymaei *et al.*, 2024). در کل تنش سرما غلظت پرولین را در برگ‌های همه دانه‌ها افزایش داد که این افزایش در گیاهان تیمار شده با متیل جاسمونات به مراتب بیشتر بود که حاکی از دخالت متیل جاسمونات در تنظیم مسیره‌های سیگنالی مرتبط با افزایش غلظت پرولین در شرایط تنش در گیاه است (Fugate *et al.*, 2018). محققین اعلام کردند که عنصر پتاسیم در زمان تنش‌های محیطی سبب افزایش میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان شده و از این راه، سبب کاهش رادیکال‌های آزاد تولید شده در شرایط تنش می‌گردد (Soleimanzadeh *et al.*, 2010).

قندهای محلول

با توجه به نتایج مقایسه میانگین‌ها (جدول ۱۰) هنگامی که تنش سرما اعمال شد، بدون مصرف پتاسیم و متیل جاسمونات، افزایشی در غلظت قندهای محلول مشاهده شد به گونه‌ای که از صفر به ۴- درجه سلسیوس، مقدار قندهای محلول بیش‌تر از ۵۵٪ افزایش حاصل نمود. با مصرف ۰/۵ میلی‌مولار پتاسیم بدون مصرف متیل جاسمونات، این افزایش به ۷۳٪ رسید. با این حال با مصرف توأم ۱۵۰ میکرومولار متیل جاسمونات و یک میلی‌مولار پتاسیم غلظت قندهای محلول از ۷۳۶ به ۱۲۰۱ میکروگرم بر گرم وزن تر می‌رسد، به عبارت دیگر افزایش ۶۳ درصدی را به دنبال داشت.

جدول ۱۰- مقایسه میانگین برهمکنش اثر متیل جاسمونات و پتاسیم بر غلظت قندهای محلول (میکروگرم بر گرم وزن تر) برگ دانه‌های پسته در شرایط تنش سرمایی

تنش سرمایی (°C)			پتاسیم (میلی‌مولار)	متیل جاسمونات (میکرومولار)
-۴	-۲	۰		
۸۹۶ ⁱ	۶۱۶ ^r	۵۷۸ ^s	۰	۰
۹۳۲ ⁱ	۶۳۴ ^q	۵۸۳ ^s	۰/۵	۰
۹۹۹ ^f	۸۹۶ ^j	۶۳۷ ^q	۱	۰
۹۹۵ ^f	۷۹۴ ^m	۶۲۸ ^q	۰	۷۵
۱۰۴۳ ^e	۸۳۰ ^l	۶۱۹ ^q	۰/۵	۷۵
۱۰۹۰ ^d	۸۵۲ ^k	۶۷۳ ^p	۱	۷۵
۹۵۵ ^h	۶۸۳ ^p	۶۱۱ ^r	۰	۱۵۰
۱۱۷۲ ^b	۹۱۰ ^j	۷۳۲ ^o	۰/۵	۱۵۰
۱۲۰۱ ^a	۹۷۴ ^g	۷۳۶ ^o	۱	۱۵۰

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ردیف یا ستون در سطح ۵ درصد آزمون دانکن، تفاوت معنی‌داری ندارند.

قندهای محلول به عنوان ترکیبات اصلی در افزایش مقاومت به سرما شناخته شده‌اند. افزایش محتوای قندهای محلول در زمستان، بخشی از مکانیسم گیاه در محافظت اسمزی، ذخیره کربن و سازگاری به تنش سرما می‌باشد. تحقیقات نشان داده است که متیل جاسمونات از طریق افزایش قندهای محلول نقش مهمی در محافظت اسمزی، ذخیره کربن و

است که مصرف یک میلی‌مولار پتاسیم به‌تنهایی این افزایش به ۲۱ درصد رسید. هم‌چنین مصرف ۷۵ میکرومولار متیل‌جاسمونات نیز به‌تنهایی، در تیمار دمایی ۴- درجه سلسیوس موجب افزایش این پارامتر به میزان ۳۲ درصد نسبت به دانهال‌های شاهد گردید. با این وجود بیش‌ترین غلظت ترکیبات فنلی مربوط به مصرف توأم این دو تیمار در بالاترین سطوح موجود (۱۵۰ میکرومولار متیل‌جاسمونات و ۱ میلی‌مولار پتاسیم) شد و سبب افزایش ۳۳ درصدی این پارامتر گردید.

حذف رادیکال‌های آزاد ایفا می‌کند (Zhou *et al.*, 2021). به نظر می‌رسد چون متیل‌جاسمونات سنتز اتیلن را تحریک کرده و در نتیجه منجر به کاهش سنتز کربوهیدرات می‌گردد، این امر منجر به تجزیه کربوهیدرات‌های ذخیره شده در گیاه گشته که در نهایت میزان قندهای محلول را در شرایط تنش افزایش می‌دهد (Pérez-Llorca *et al.*, 2023).

پژوهشگران دریافتند که عنصر پتاسیم منجر به باز شدن روزنه‌ها و در نتیجه افزایش فتوسنتز در گیاه می‌شود و بدین ترتیب احتمالاً موجب افزایش مواد قندی در برگ و به تبع آن در اندام‌های گیاهی می‌گردد. پتاسیم با افزایش کربوهیدرات‌های محلول، پتانسیل اسمزی را بالا برده و منجر به پایین آوردن نقطه انجماد می‌شود و سلول را در برابر دهیدراسیون محافظت می‌کند. نتایج محققین با نتایج بدست آمده در مورد اثر مثبت پتاسیم بر افزایش مقاومت به سرما و رابطه آن با تجمع کربوهیدرات مطابقت دارد (Slavcheva & Encheva, 2004).

ترکیبات فنلی

نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌ها (جدول ۱۱)، در پایان تیمار سرمادهی نشان داد که با کاهش دما از صفر به ۴- درجه سلسیوس محتوای ترکیبات فنلی روند افزایشی داشته و به میزان ۱۵ درصد مقدار فنل کل نسبت به دانهال‌های شاهد افزایش یافت. این در حالی

جدول ۱۱- مقایسه میانگین برهمکنش اثر متیل جاسمونات و پتاسیم بر غلظت فنل کل (میکروگرم بر گرم وزن تازه) برگ دانه‌های پسته در شرایط تنش سرمایی.

تنش سرمایی (°C)	پتاسیم (میلی‌مولار)		متیل جاسمونات (میکرومولار)	
	-۴	-۲	۰	۰/۵
۳۶۴ ^{b-f}	۲۸۵ ^{ghi}	۳۱۵ ^{hi}	۰	۰
۳۹۳ ^{b-f}	۳۴۴ ^{fgh}	۳۲۷ ^{ghi}	۰/۵	۰
۴۰۵ ^{d-h}	۳۴۸ ^{fgh}	۳۳۳ ^{ghi}	۱	۰
۴۱۶ ^{bcd}	۳۳۳ ^{ghi}	۳۱۵ ^{hi}	۰	۷۵
۴۱۷ ^{bcd}	۳۵۰ ^{fgh}	۳۳۶ ^{ghi}	۰/۵	۷۵
۴۲۳ ^b	۳۵۷ ^{efgh}	۳۴۳ ^{fgh}	۱	۷۵
۴۱۸ ^{bc}	۳۴۶ ^{fgh}	۳۲۴ ^{ghi}	۰	۱۵۰
۴۲۸ ^b	۳۵۵ ^{efgh}	۳۴۰ ^{fgh}	۰/۵	۱۵۰
۴۸۳ ^a	۳۶۹ ^{c-g}	۳۵۵ ^{c-g}	۱	۱۵۰

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ردیف یا ستون در سطح ۵ درصد آزمون دانکن، تفاوت معنی‌داری ندارند.

در شرایط عدم مصرف متیل جاسمونات، محتوای پروتئین‌های محلول با افزایش معنی‌داری روبه‌رو گشت و موجب افزایش ۲۴، ۴۶ و ۵۰ درصدی نسبت به تیمار شاهد (در دماهای مربوط به هر تیمار) به ترتیب در دماهای صفر، -۲ و -۴ درجه سلسیوس گردید. در شرایط مصرف متیل جاسمونات به تنهایی و بدون مصرف پتاسیم، محتوای پروتئین‌های محلول نسبت به تیمار شاهد به میزان ۱۷/۵، ۳۱ درصد به ترتیب در دماهای صفر و ۲ درجه سلسیوس افزایش یافت. این درحالی بود که در دمای -۴ درجه سلسیوس تیمار ۱۵۰ میکرومولار متیل جاسمونات اختلاف معنی‌داری نسبت به تیمار شاهد ایجاد نکرد. با این وجود نتایج حاکی از آن است که بیش‌ترین تأثیر در افزایش محتوای پروتئین‌های محلول در هر تیمار دمایی، مربوط به زمانی است که از تیمار ۱۵۰ میکرومولار متیل جاسمونات و یک میلی‌مولار پتاسیم به

تجمع ترکیبات فنلی یکی از راهکارهای سازگاری به سرما می‌باشد. این ترکیبات رابطه‌ی مثبتی با ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گیاه دارند (Balasundram *et al.*, 2006). افزایش ترکیبات فنلی طی مرحله‌ی سازگاری با سرما، در پسته گزارش شده است (Pakkish *et al.*, 2007). افزایش قابل توجه محتوای فنل کل در میوه‌های تیمار شده با متیل جاسمونات در توت‌فرنگی نیز مشاهده شد (Wang *et al.*, 2008). اثر کاربرد پتاسیم بر افزایش ترکیبات فنلی احتمالاً به دلیل نقش این عنصر در آنزیم‌هایی است که این ترکیبات را سنتز می‌کنند (Marschner, 2011).

مجموع پروتئین‌های محلول

نتایج مقایسه میانگین‌ها که در جدول شماره ۱۲ آمده است، نشان می‌دهد که با اعمال تیمار سرما، محتوای پروتئین‌های محلول برگ با کاهش ۲۰ درصدی مواجه شده است. لیکن با مصرف یک میلی‌مولار پتاسیم

صورت توأم استفاده شد بدین صورت که سبب افزایش این پارامتر به میزان ۴۷، ۶۷ و ۸۳ درصد نسبت به دانهال‌های تیمار شاهد گردید.

جدول ۱۲- مقایسه میانگین برهمکنش اثر متیل جاسمونات و پتاسیم بر غلظت پروتئین‌های محلول (میلی‌گرم بر گرم وزن تازه) برگ دانهال‌های پسته در شرایط تنش سرمایی.

تنش سرمایی (°C)			پتاسیم (میلی‌مولار)	متیل جاسمونات (میکرومولار)
-۴	-۲	۰		
۰/۰۱۴۳ ^o	۰/۰۱۵۰ ⁿ	۰/۰۱۷۷ ^m	۰	۰
۰/۰۱۴۹ ⁿ	۰/۰۱۷۶ ^m	۰/۰۱۹۷ ^k	۰/۵	۰
۰/۰۲۱۳ ^{hi}	۰/۰۲۲۰ ^{d-f}	۰/۰۲۲۰ ^{d-f}	۱	۰
۰/۰۱۶۹ ^m	۰/۰۱۸۶ ^l	۰/۰۲۱۳ ^{hi}	۰	۷۵
۰/۰۲۳ ^{jk}	۰/۰۲۰۹ ⁱ	۰/۰۲۱۰ ^{hi}	۰/۵	۷۵
۰/۰۲۱۷ ^{hi}	۰/۰۲۲۰ ^{d-f}	۰/۰۲۳۰ ^{c-e}	۱	۷۵
۰/۰۱۴۳ ^o	۰/۰۱۹۷ ^k	۰/۰۲۰۸ ^{ij}	۰	۱۵۰
۰/۰۲۲۷ ^{c-e}	۰/۰۲۳۰ ^{c-e}	۰/۰۲۳۰ ^{c-e}	۰/۵	۱۵۰
۰/۰۲۶۰ ^a	۰/۰۲۵۰ ^b	۰/۰۲۶۰ ^a	۱	۱۵۰

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ردیف یا ستون در سطح ۵ درصد آزمون دانکن، تفاوت معنی‌داری ندارند.

اکسیژن جلوگیری می‌کند (Hu & Schmidhalter, 2005).
نشاسته

همانطور که در جدول مقایسه میانگین‌ها (جدول ۱۳)، مشاهده می‌شود، با کاهش دما، محتوای نشاسته نیز با کاهش معنی‌داری روبه‌رو شد. در شرایط تنش سرمایی با مصرف یک میلی‌مولار پتاسیم در دمای صفر درجه سلسیوس، مقدار نشاسته حدود ۵۸ درصد افزایش حاصل نمود هم‌چنین مصرف پتاسیم موجب افزایش ۵۱ و ۲۶ درصدی محتوای نشاسته به ترتیب در دمای -۲ و ۴ درجه سلسیوس شد. این درحالی بود که با مصرف متیل جاسمونات به تنهایی، نقش کم‌رنگ‌تری در افزایش

به نظر می‌رسد متیل جاسمونات با افزایش غلظت پرولین و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در برگ دانهال‌های تیمار شده، موجب افزایش محتوای پروتئین‌های محلول گردید. گزارش شده است که متیل جاسمونات باعث القاء بیان ژن یک سری از پروتئین‌های شوک گرمایی شده و از این طریق باعث افزایش مقاومت در مقابل صدمات ناشی از سرما در میوه گوجه فرنگی شده است (Wang et al., 2005).

پتاسیم از طریق افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت رادیکال‌های اکسیژن فعال را خنثی می‌کند و در نتیجه از تخریب پروتئین‌ها توسط گونه‌های آزاد

محتوای نشاسته برگ در مقایسه با پتاسیم داشت. کاربرد
 ۱۵۰ میکرومولار متیل جاسمونات تنها در دمای صفر و
 -۴ درجه سلسیوس سبب افزایش محتوای نشاسته
 گردید. با این وجود، نتایج نشان داد که بیش‌ترین میزان
 محتوای نشاسته در هر تیمار سرمایی مربوط به مصرف
 توأم این دو پارامتر در بالاترین سطوح موجود است و
 نسبت به دانهال‌های شاهد افزایش ۶۸، ۷۴ و ۴۹ درصدی
 را به دنبال داشت.

جدول ۱۳- مقایسه میانگین برهمکنش اثر متیل جاسمونات و پتاسیم بر غلظت نشاسته (میلی‌گرم بر گرم وزن خشک) برگ دانهال‌های پسته در شرایط تنش سرمایی.

تنش سرمایی (°C)	تنش سرمایی (°C)		پتاسیم (میلی‌مولار)	متیل جاسمونات (میکرومولار)
	-۴	-۲		
۷۶ ^m	۷۸/۱ ^{lm}	۸۲/۵ ^{j-1}	۰	۰
۸۱/۱ ^{k-m}	۸۴ ^{jk}	۹۵/۳ ^{hi}	۰/۵	۰
۹۵/۸ ^{hi}	۱۱۸ ^e	۱۳۰ ^{bc}	۱	۰
۸۴ ^{jk}	۱۰۸ ^g	۹۵/۷ ^{hi}	۰	۷۵
۸۶/۷ ^j	۱۱۳ ^f	۱۱۸ ^{ef}	۰/۵	۷۵
۹۴/۸ ⁱ	۱۲۰ ^{de}	۱۱۸ ^{ef}	۱	۷۵
۸۷ ^j	۹۵/۷ ^{hi}	۱۱۳ ^f	۰	۱۵۰
۱۰۰ ^h	۱۲۵ ^{cd}	۱۳۴ ^b	۰/۵	۱۵۰
۱۱۳ ^f	۱۳۱ ^b	۱۴۳ ^a	۱	۱۵۰

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ردیف یا ستون در سطح ۵ درصد آزمون دانکن، تفاوت معنی‌داری ندارند.

زمانی که دما در فصل پاییز کاهش می‌یابد، میزان
 نشاسته نیز کاهش پیدا می‌کند و به قندهای محلول
 افزوده می‌شود، زیرا نشاسته یک پلی‌ساکارید می‌باشد که
 در نتیجه‌ی فعالیت آنزیم‌هایی چون مالتاز و آمیلاز به
 گلوکز تبدیل می‌شود (Zhang et al., 2023). افزایش
 نشاسته در نتیجه کاربرد توأم متیل جاسمونات و پتاسیم
 احتمالاً به دلیل اثر آن‌ها بر محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی
 نظیر کلروفیل کل و کارتنوئید می‌باشد که سبب حفظ
 فعالیت فتوسنتزی در شرایط سرما و تولید قند شده و در
 نهایت مقدار نشاسته کم‌تری تجزیه می‌شود و نسبت به
 تیمار شاهد با افزایش روبه‌رو می‌گردد.

نتیجه‌گیری کلی

نشت یونی برگ یکی از فاکتورهای مهمی است
 که نشان‌دهنده میزان تحمل گیاه به سرما می‌باشد. نتایج
 بدست آمده از این تحقیق نشان داد، تنش سرما موجب
 افزایش معنی‌دار نشت یونی گردید که کاربرد
 متیل جاسمونات و پتاسیم سبب کاهش این پارامتر مهم
 نسبت به دانهال‌های شاهد شد. در شرایط تنش سرما
 یکی از معیارهای مقاومت در گیاه تولید تنظیم‌کننده‌های
 اسمزی است. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که تنش
 سرما باعث افزایش میزان تنظیم‌کننده‌های اسمزی نظیر

۲. مظفری، و. و جعفری، ز. ۱۴۰۲. اثر پاکلوبوترازول و کلسیم در افزایش تحمل به سرمازدگی دانه‌ها و درختان پسته. تحقیقات کاربردی خاک، جلد ۱۱، شماره ۲، ۸۲-۹۴.
۳. مظفری، و. و یزدان‌پناه، ف. ۱۳۹۸. تأثیر اسید سالیسیلیک و کلسیم بر مقاومت به سرمازدگی دانه‌های پسته رقم کله. تحقیقات کاربردی خاک، جلد هفتم، شماره ۴، ۶۱-۴۷. قوچی
5. Asghari, M., & Hasanlooe, A. R. (2016). Methyl jasmonate effectively enhanced some defense enzymes activity and Total Antioxidant content in harvested "Sabrosa" strawberry fruit. *Food Science and Nutrition*, 4, 377-383. <https://doi.org/10.1002/fsn3.300>.
6. Balasundram, N., Sundram, K., & Samman, S. (2006). Phenolic compounds in plants and agri-industrial by-products: Antioxidant activity, occurrence, and potential uses. *Food Chemistry*, 99, 191-203. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.07.042>.
7. Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72, 248-254. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3).
8. Capitani, F., Biondi, S., Falasca, G, Ziosi, پرولین، قندهای محلول و ترکیبات فنلی شد که مصرف توأم متیل‌جاسمونات و پتاسیم منجر به افزایش این پارامترها نسبت به شاهد گردید. همچنین در این پژوهش شاخص‌های کلروفیل فلورسانس، کلروفیل کل، پروتئین و نشاسته نیز مورد ارزیابی قرار گرفتند که تنش سرما باعث کاهش معنی‌دار آن‌ها شد. لیکن کاربرد متیل‌جاسمونات و پتاسیم سبب افزایش پارامترهای ذکر شده نسبت به تیمار شاهد گردید. در نهایت مشخص گردید که در شرایط تنش سرمایی، مصرف توأم متیل‌جاسمونات و پتاسیم از طریق بهبود پارامترهای فتوسنتزی و تنظیم‌کننده‌های اسمزی، باعث کاهش اثرات سرمازدگی دانه‌های پسته گردید. محلول پاشی متیل‌جاسمونات به‌ویژه با غلظت ۱۵۰ میکرومولار به‌صورت توأم با یک میلی‌مولار پتاسیم قادر به افزایش تحمل به سرما در دانه‌های پسته است و می‌تواند به عنوان یک ابزار پیشگیری‌کننده برای محافظت از سرمازدگی در باغ‌های پسته به‌کار رود.

منابع

۱. خادمی، ا، فکری، م. و کیانی، ب. ۱۳۹۴. تأثیر محلول‌پاشی عناصر غذایی بر روی سرمازدگی بهاره درختان پسته (رقم کله‌قوچی). سیزدهمین همایش سراسری آبیاری و کاهش تبخیر. دانشگاه شهید باهنر کرمان. سوم شهریور ماه.

- <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110868>.
14. Dreyer, A., & Dietz, K. J. (2018). Reactive Oxygen Species and the Redox-Regulatory Network in Cold Stress Acclimation. *Antioxidants*, 7, 169. <https://doi.org/10.3390/antiox7110169>.
 15. Fahimi Khoyerdi, F., Shamshiri, M. H., & Estaji, A. (2016). Changes in some physiological and osmotic parameters of several pistachio genotypes under drought stress. *Scientia Horticulturae*, 198, 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.11028>.
 16. Foyer, C. H. (2018). Reactive oxygen species, oxidative signaling and the regulation of photosynthesis. *Environmental and Experimental Botany*, 154, 134-142. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.201805003>.
 17. Fugate, K. K., Lafta, A. M., Eide, J. D., Li, G., Lulai, E. C., Olson, L. L., Deckard, E. L., Khan, M. F. R., & Finger, F. L. (2018). Methyl jasmonate alleviates drought stress in young sugar beet (*Beta vulgaris* L.) plants. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 6, 566-576. <https://doi.org/10.1111/jac.12286>.
 18. Hu, Y., & Schmidhalter, U. (2005). Drought and salinity: a comparison of their effect on mineral nutrition of plant. *Journal of Plant Nutrition and soil Science*, 168, 541-549. <https://doi.org/10.1002/jpln.200420516>.
 19. Johnson, R., Vishwakarma, K., Hossen, Md. S. Kumar, V., Shackira, A. M., Puthur, J. T., Abdi, G., Sarraf, M., & V., Balestrazzi, A., Carbonera, D., Torrigiani, P., & Altamura, M. M. (2005). Methyl jasmonate disrupts shoot formation in tobacco thin cell layers by over-inducing mitotic activity and cell expansion. *Planta*, 22, 507-519. <https://doi.org/10.1007/s00425-004-1362-y>.
 9. Chavoushi, M., Arvin, M. J., & Kalantari, K. H. (2010). Effect of jasmonate on photosynthetic pigments, protein content, Na⁺, K⁺ ions and some growth parameters in *Carthamus tinctorius* under salinity stress. *Iranian Journal of Biology*, 23, 397-408.
 10. Chavoushi, M., Manoochehri Kalantari, K., & Arvin, M. J. (2019). Effect of salinity stress and exogenously applied methyl jasmonate on growth and physiological traits of two *Carthamus tinctorius* varieties. *International Journal of Horticultural Science and Technology*, 6: 39-49. <https://doi.org/10.22059/ijhst.2019.277800.283>.
 11. Christie, W. W., & Harwood, J. L. (2020). Oxidation of polyunsaturated fatty acids to produce lipid mediators. *Essays in Biochemistry*, 64, 401–421. <https://doi.org/10.1042/EBC20190082>.
 12. Ding, F., Wang, X., Li, Z., & Wang, M. (2023). Jasmonate positively regulates cold tolerance by promoting aba biosynthesis in tomato. *Plants*, 12, 60. <https://doi.org/10.3390/plants12010060>.
 13. Donderalp, V., & Dursun, A. (2022). Improvement of frost tolerance in tomato by foliar application of potassium sulphate. *Scientia Horticulturae*, 259, 110868.

- Zhang, X. (2021). Methyl jasmonate mediates melatonin-induced cold tolerance of grafted watermelon plants. *Horticulture Research*, 8, 57. <https://doi.org/10.1038/s41438-021-00496-0>.
25. Lichtenthaler, H. K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*, 148, 350–382. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1).
26. Lutts, S., Kinet, J. M., & Bouharmont, J. (1996). NaCl-induced senescence in leaves of rice (*oryza sativa* L.) cultivars differing in salinity resistance. *Annals of Botany*, 78, 389-398. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1).
27. Marschner, H., (Ed.). (2011). Mineral nutrition of higher plants. Academic Press. Limited London. Second edition, 674.
28. Matysiak, B., & Bielenin, M. (2005). Effect of nutrient solution composition on growth, flowering, nutrient status and cold hardiness of *Rhododendron yakushimanum* grown on ebb-and-flow benches. *European Journal of Horticultural Science*, 70, 35-42.
29. Pakkish, Z., Rahemi, M., & Baghizadeh, A. (2009). Seasonal changes of peroxidase, polyphenol oxidase enzyme activity and phenol content during and after rest in pistachio (*Pistacia vera* L.) Flower Buds. *World Applied Sciences*, 6, 1193-1199.
- Hasanuzzaman, M. (2022). Potassium in plants: Growth regulation, signaling, and environmental stress tolerance. *Plant Physiology and Biochemistry*, 172, 56-69. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.01.001>.
20. Karimi, H.R., Zarei, F., Mirdehghan, S.H., Mohammadi Mirik, A.K., Sarkhosh, A., 2020. Correlation among some biochemical compounds in fruit, leaf, and shoot bark of pomegranate trees for breeding programs. *International Journal of Fruit Science*, 20, 805–824. <https://doi.org/10.1080/15538362.2019.1674763>.
21. Khezri, M., Heerema, R., Brar, G. P. S., & Ferguson, L. (2020). Alternate bearing in pistachio (*Pistacia vera* L.): a review. *Trees*, 34, 855–868. <https://doi.org/10.1007/s00468-020-01967-y>.
22. Koc, E, Islek, C, & Ustun, AS. (2010). Effect of cold on protein, proline, phenolic compounds and chlorophyll content of two pepper (*Capsicum annuum* L.) varieties. *Journal of Science*, 23,1-6.
23. Li, C., Zhang, J., Wei, M., Ge, Y., Hou, J., Cheng, Y., & Chen, J. (2019). Methyl jasmonate maintained antioxidative ability of ginger rhizomes by regulating antioxidant enzymes and energy metabolism. *Scientia Horticulturae*, 256, 108578. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.10.8578>
24. Li, H., Guo, Y., Lan, Z., Xu, K., Chang, J., Ahammed, G., Ma, J., Wei, C., &

- conditions. *Scientia Horticulturae*, 323, 112488.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112488>.
36. Raza, A., Charagh, S., Najafi-Kakavand, S., Abbas, S., Shoaib, Y., Anwar, S., Sharifi, S., Lu, G., & Siddique, K. H. M. (2023). Role of phytohormones in regulating cold stress tolerance: Physiological and molecular approaches for developing cold-smart crop plants. *Plant Stress*, 8, 100152.
<https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100152>.
37. Saadati, S., Baninasab, B., Mobli, M., & Gholami, M. (2021). Foliar application of potassium to improve the freezing tolerance of olive leaves by increasing some osmolite compounds and antioxidant activity. *Scientia Horticulturae*, 276, 109765.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109765>.
38. Salavati, J., Fallah, H., Niknejad, Y., & Tari, D. B. (2021). Methyl jasmonate ameliorates lead toxicity in *Oryza sativa* by modulating chlorophyll metabolism, antioxidative capacity and metal translocation. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 27, 1089–1104. doi: 10.1007/s12298-021-00993-5.
39. Sene, M., Thevenot, C., & Prioul, J. L. (1997). Simultaneous spectrophotometric determination of amylose and amylopectin in starch from maize kernel by multi-wavelength analysis. *Journal of Cereal Science*, 26, 211-221.
<https://doi.org/10.1006/jcrs.1997.0124>
- <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:15617012>.
30. Pal, P., & Ghosh, P. (2010). Effect of different sources and levels of potassium on growth, flowering and yield of African marigold (*Tajetes erecta* L. CV. Siracole). *Journal of Natural Products and Resources*, 1, 371-375.
31. Paquin, R., & Lechasseur, P. (1979). Observations sur une methode de dosage de la proline libre dans les extraits de plantes. *Canadian Journal of Botany*, 57, 1851-1854. <https://doi.org/10.1139/b79-233>.
32. Percival, G., & Henderson, A. (2003). An assessment of the freezing tolerance of urban trees using chlorophyll fluorescence. *Arboriculture*, 24, 19-27.
<https://doi.org/10.1080/14620316.2003.1511614>.
33. Pérez-Llorca, M., Pollmann, S., & Müller, M. (2023). Ethylene and jasmonates signaling network mediating secondary metabolites under abiotic stress. *International Journal of Molecular Sciences*, 24, 5990.
<https://doi.org/10.3390/ijms24065990>.
34. Perry, T. W., Rhykerd, C. L., Holt, D. A., & Mayo, H. H. (2011). Effect of potassium fertilization on chemical characteristics, yield and nutritive value of corn silage. *Journal of Animal Science*, 34, 642-646.
35. Peymaeim, M., Sarabi, V., & Hashempour, H. (2024). Improvement of the yield and essential oil of fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.) using external proline, uniconazole and methyl jasmonate under drought stress

46. Ulloa-Inostroza, E. M., Córdova, C., Campos, M., & Reyes-Díaz, M. (2024). Methyl jasmonate improves antioxidants, protecting photosynthetic apparatus in blueberry plants under water deficit. *Horticulturae*, 10, 259. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10030259>.
47. Wang, C. Y., Fung, R. W. M., & Ding, C. K. (2005). Reducing chilling injury and enhancing transcript levels of heat shock proteins, PR-proteins and alternative oxidase by methyl jasmonate and methyl salicylate in tomatoes and peppers. *Acta Horticulturae*, 682, 481-486. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.682.58>.
48. Wang, M., Zheng, Q., Shen, Q., & Guo, S. (2013). The critical role of potassium in plant stress response. *International Journal of Molecular Sciences*, 14, 7370–7390. <https://doi.org/10.3390/ijms14047370>.
49. Wang, SY, Bowman, L, Ding, M. (2008). Methyl jasmonate enhances antioxidant activity and flavonoid content in blackberries (*Rubus* sp.) and promotes antiproliferation of human cancer cells. *Food Chemistry*, 107, 1261-1269.
50. Włodarczyk, K., Smolińska, B., & Majak, I. 2023. The antioxidant potential of tomato plants (*Solanum lycopersicum* L.) under nano-ZnO Treatment. *International Journal of Molecular Sciences*, 24, 11833. <https://doi.org/10.3390/ijms241411833>.
51. Zhang, W., Zhang, A., Zhou, Q., Fang, R., Zhao, Y., Li, Z., Zhao, J., Zhao, M., Ma, S., Zhao, Y., & Huang, Z. (2023). 40. Sirhindi, G., Mushtaq, R., Singh Gill, S., Sharma, P., Allah, E. F. A., & Ahmad, P. (2020). Jasmonic acid and methyl jasmonate modulate growth, photosynthetic activity and expression of photosystem II subunit genes in *Brassica oleracea* L. *Scientific Reports*, 10, 9322. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65309-1>.
41. Slavcheva, T, & Encheva, H. (2004). Influence of potassium fertilizing on the cold resistance of grapevine. *Lozarstvo I Vinnarstvo*, 5, 38-42.
42. Soleimanzadeh, H, Habibi, D, Ardakani, MR, Paknejad, F, & Rejali, F. (2010). Response of sunflower (*Helianthus Annuus* L.) to drought stress under different potassium levels. *World Applied Sciences Journal*, 8, 443-448.
43. Taiz, L., & Zeiger, E. (2002). *Plant Physiology*. (2nd Ed.). Sinauer Associates, Inc., Publishers. Sunderland, Massachusetts. USA, 764p.
44. Tavakol, E., Jáklí, B., Cakmak, I., Dittert, K., & Senbayram, M. (2022). Optimization of Potassium Supply under Osmotic Stress Mitigates Oxidative Damage in Barley. *Plants*, 11, 55. <https://doi.org/10.3390/plants11010055>.
45. Trong, L. V., Thinh, B. B., Chinh, H. V., & Giang, T. V. (2022). Effects of low temperature and potassium chloride on physiological and biochemical indices of rice (*Oryza sativa* L.) at the seedling stage. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 24, 847-859. <http://jast.modares.ac.ir/article-23-51898-en.html>.

(2021). Effects of chilling acclimation and methyl jasmonate on sugar metabolism in tomato fruits during cold storage. *Scientia Horticulturae*, 289, 110495.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110495>.

Low-temperature at booting reduces starch content and yield of wheat by affecting dry matter transportation and starch synthesis. *Frontiers Plant Science*, 14, 1207518.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1207518>.

52. Zhou, J., Min, D., Li, Z., Fu, X., Zhao, X., Wang, J., Zhang, X., Li, F., & Li, X.

The Effect of Methyl Jasmonate and Potassium on Resistance Induction to Chilling of Pistachios Seedlings, cv. Kaleghochi

Vahid Mozafari^{1*}, Haniye Masoudpoor², Mojdeh Khalilpour³, Ahmad Tajabadi Pour⁴,
Majid Eesmaeilzadeh⁵

Abstract

In order to investigate the effects of methyl jasmonate and potassium on resistance to chilling of pistachios seedlings, a factorial experiment was carried out in a completely randomized design with three replications in greenhouse. Treatments consisted of methyl jasmonate (0, 75 and 150 μ M), potassium (0, 0.5 and 1mM of potassium sulfate source) and temperature (0, -2 and -4 °C). The results showed that, leaf electrolyte leakage increased with decreasing in temperature, but with combined application of 150 μ M methyl jasmonate and 1mM potassium, electrolyte leakage decreased by 48, 36 and 45% at 0, -2 and -4 °C, respectively. Also, at the temperature of -4 °C, with the combined consumption of 150 μ M methyl jasmonate and 1mM potassium, the concentration of proline, soluble sugars, and phenolic compounds increased by 88, 34, and 33%, respectively, compared to control plants. Also, the results of this experiment showed that with decreasing in temperature, the concentration of carotenoids, the content of soluble proteins and starch decreased, but with the combined consumption of 150 μ M methyl jasmonate and 1mM potassium, the value of these parameters increased by 95, 86 and 49%, respectively, compared to the control at temperature -4 °C. Based on the results obtained from this research, it was determined that in the conditions of chilling stress, the combined use of methyl jasmonate and potassium through the improvement of photosynthetic parameters and osmotic regulators can reduce the effects of frostbite on pistachio seeds.

Keywords: Chlorophyll fluorescence index, electrolyte leakage, Phenolic compounds, Proline

¹ Professor, Soil Sciences and Engineering Department, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran.

* Corresponding Author: mozafari@vru.ac.ir

² Graduated M.Sc student in Soil Sciences and Engineering Department, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran.

³ Graduated PhD student in Soil Sciences and Engineering Department, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran.

⁴ Professor, Soil Sciences and Engineering Department, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran.

⁵ Associate professor of Horticultural Science and Engineering Department, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran.