مجله علوم و فنون باغبانی ایران جلد ۲۳ شماره ۴ صفحه های ۵۵۵ تا ۵۶۶ (۱۴۰۱)
مقاله پژوهشی

بهبود ویژگی‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی دو رقم پسته در شرایط تنش شوری با کاربرد کودهای سولفات پتاسیم و نانوپتاسیم[1]

Improving the Physiological and Biochemical Properties of Two Pistachio Cultivars by Application of Potassium Sulfate and Nanopotassium Fertilizers under Salinity Stress Conditions

محمد حسن موحدی، سعید عشقی، مجید راحمی*، احمد رئوفی، سحر صداقت[2]

چکیده

به‌منظور بررسی تأثیر شوری و کودهای سولفات پتاسیم و نانوپتاسیم بر دو رقم پسته، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح به‌طورکامل تصادفی با چهار تکرار انجام گرفت. تیمارها شامل سه سطح شوری (۰/۵، ۸ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر) و دو تیمار کودی سولفات پتاسیم (۱ و ۲ درصد) و نانو پتاسیم (۲ و ۴ گرم در لیتر) بود. نتایج نشان داد که مقدار کلروفیل کل، پتاسیم ریشه و میزان پرولین در رقم اکبری نسبت به رقم احمدآقایی، بیشتر است. بیشترین میزان کلروفیل کل در رقم اکبری با شوری ۰/۵ دسی‌زیمنس بر متر و در تیمار کود نانوپتاسیم ۲ گرم در لیتر مشاهده شد. کم‌ترین میزان سدیم ریشه مربوط به رقم اکبری با شوری ۰/۵ دسی‌زیمنس بر متر و کمترین سدیم ریشه در شوری ۰/۵ دسی‌زیمنس بر متر با کوددهی سولفات پتاسیم یک درصد بود. کم‌ترین میزان پرولین در شوری ۰/۵ دسی‌زیمنس بر متر در رقم احمدآقایی و بیش‌ترین میزان پرولین در شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر در رقم اکبری بود. بیشترین میزان پرولین مربوط به کوددهی با ۲ گرم بر لیتر نانوپتاسیم بود. کاربرد کودهای پتاسیمی اثرهای نامطلوب شوری بر دانهال‌های پسته را کاهش داد.

واژه‌های کلیدی: پرولین، سدیم، کلر، کلروفیل و مالون دی آلدئید.

مقدمه

پسته (*Pistacia vera* L.) یکی از خشک میوه‌های مهمی هست که به صورت گسترده در ایران کشت و کار می‌شود. این خشک میوه به‌دلیل وجود پروتئین بالا، ترکیب‌های فنولی و عناصر معدنی دارای ارزش غذایی بالایی است (۲۲). یکی از مهمترین عوامل تأثیرگذار بر میزان عملکرد درختان پسته، تنش‌های محیطی به‌ویژه تنش شوری است.

تنش شوری بسیاری از پاسخ‌های فیزیولوژیک، مورفولوژیک و بیوشیمیایی گیاه مانند ارتفاع، وزن تر و خشک اندام‌های گیاهی، سطح برگ، کارایی مصرف آب، میزان قند و نشاسته و رنگدانه‌ها را زیر تأثیر قرار می‌دهد (۲۱، ۲۳). جذب آب از طریق ریشه‌ها و همچنین سمیت یون‌های وارده به برگ‌ها در نتیجه غلظت بالای نمک‌ها در آب و خاک، از اثرهای تنش شوری در گیاهان است. گیاهان در مقابله با این اثرات، واکنش‌هایی چون افزایش غلظت اسمولیت‌ها، ممانعت از ورود یون‌های مضر به یاخته و دفع آن‌ها را از خود بروز می‌دهند که به دنبال آن‌ها، تحمل به شوری ایجاد می‌شود (۱۶). راهکارهای مختلفی را می‌توان جهت بهبود تحمل به شوری در گیاهان استفاده کرد که از جمله می‌توان به کشت پایه‌های متحمل به شوری (۲۱)، کاربرد خارجی انواع مواد شیمیایی (۲۲) و کاربرد عناصر معدنی (۱،۲) اشاره نمود. جذب عناصر غذایی به‌عنوان یکی از جنبه‌های اصلی تحمل به شوری در گونه‌های مختلف مورد توجه قرار گرفته است.

۱- تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۴/۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۸/۳

۲- به ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، استادان و دانش‌آموخته‌های دکتری، بخش علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.
* نویسنده مسئول، پست الکترونیک: (rahemi@shirazu.ac.ir).

برهمکنش بین شوری و عناصر غذایی، اغلب جذب عناصر غذایی و در نهایت انباشت و توازن عناصر غذایی در بافت‌های گیاهی را زیر تأثیر قرار می‌دهد (۲۵).

پژوهش‌های متعددی که در زمینه مهار شوری انجام شده نشان می‌دهد که کاربرد محلول‌پاشی برگی بعضی از عناصر غذایی از جمله پتاسیم، کلسیم، منیزیم و نیتروژن می‌تواند اثر سوء تنش شوری را کاهش دهد و به عبارت دیگر تحمل نسبی گیاه را به تنش شوری افزایش دهد (۲۷). پتاسیم یکی از مهم‌ترین عناصر در بین ترکیبات معدنی گیاه است که نقش مهمی در افزایش فشار اسمزی یاخته‌های ریشه دارد. افزایش فشار اسمزی، لازمه تعادل آب داخل گیاه و انتقال نمک‌ها از راه فشار آماس در آوند چوبی است (۱۳). گیاهان در محیط‌های شور برای ادامه زندگی به مقدار کافی یون پتاسیم نیاز دارند، چون در این محیط‌ها جایگزینی سدیم با پتاسیم در دیواره یاخته‌ای ریشه گیاه صورت می‌گیرد و افزایش در میزان پتاسیم بافت گیاه با روش‌های مختلف خاکی و محلول‌پاشی باعث ایجاد تحمل در گیاهان حساس به شوری می‌شود (۲). محلول‌پاشی کودهای پتاسیمی به‌منظور کاهش تنش شوری در بسیاری از گیاهان از جمله سویا (۱)، آفتابگردان (۴)، چغندرقند (۲۸) و گوجه‌فرنگی (۳) گزارش شده است.

کودهای نانو، کودهای مغذی هستند که به‌طور کلی یا جزئی از فرمولاسیون‌های ساختار نانو تشکیل شده‌اند که توانایی انتقال در گیاه، جذب و کند آزاد سازی مواد فعال را دارند. کودهای معمولی کارایی جذب پایینی دارند و در نتیجه میزان بالاتری می‌بایست مصرف شود. کودهای نانو جهت تنش‌های غیرزنده مانند خشکی، گرما، شوری، غرقاب شدن و سرما استفاده می‌شوند که سبب بهبود صدمه‌های ناشی از این تنش‌ها از راه افزایش محصول و کیفیت می‌شود. بسیاری از کودهای نانو در گیاهان مختلف باعث افزایش تحمل به شوری و خشکی، بهبود تنژگی و رشد گیاهان می‌شوند (۹).

از آن‌جایی که محلول‌پاشی پتاسیم سبب جذب سریع در گیاه می‌شود و همچنین کاربرد کودهای نانو به منظور کنترل دقیق آزادسازی عناصرغذایی می‌تواند سبب افزایش عملکرد کمی وکیفی گیاهان شود، بنابراین، هدف از انجام پژوهش حاضر بررسی اثر سطوح مختلف سولفات پتاسیم و نانو پتاسیم بر ویژگی‌های مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی دو رقم پسته اکبری و احمدآقایی در شرایط شوری خاک است.

مواد و روش‌ها

شرایط آزمایش و مواد گیاهی

مطالعه حاضر در گلخانه پژوهشی دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز انجام گرفت. دمای گلخانه در روز ۲۴ تا ۲۸ (±۲) درجه سیلسوس و در شب ۱۶ تا ۲۰ (±۲) درجه سلسیوس و رطوبت نسبی محیط آن ۶۰٪ بود. مراحل آماده‌سازی و استقرار رقم‌های پسته در گلدان به این شرح است که ابتدا بذرهای رقم‌های اکبری و احمدآقایی از پژوهشکده پسته کشور تهیه شد. بذرهای هر رقم به طور جداگانه پس از شستشو با محلول هیپوکلریت سدیم پنج درصد به مدت پنج دقیقه و سپس با محلول قارچ‌کش کاپتان دو در هزار ضدعفونی شده و آماده انتقال به داخل گلدان شدند. گلدان‌های مورد نظر از جنس پلاستیک به ارتفاع ۴۰ و قطر ۳۰ سانتی‌متر بودند که انتهای آن‌ها به تعداد کافی سوراخ زهکش داشت و به ضخامت هشت سانتی‌متر با شن درشت پر شده و سپس با خاک لومی شن الک شده (الک دو میلی‌متری) و خاک برگ پر شدند (جدول ۱). عمق نهایی خاک در هر گلدان حدود ۳۰ سانتی‌متر بود.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی آمیخته خاکی مورد استفاده در این مطالعه.

Table 1. Some physico-chemical properties of the soil mixture used in this study.

نیتروژن (٪) Nitrogen	فسفر (میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) P (mg Kg^{-1})	پتاسیم کل (میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) K (mg L^{-1})	سیلت (%) Silt	شن (%) Sand	رس (%) Clay	قابلیت هدایت الکتریکی خاک (دسی‌زیمنس بر متر) EC (dS m^{-1})	پی‌اچ pH
0.098	20	267	46	19	35	2.30	7.47

تیمارهای آزمایش

از سه تیمار مختلف شوری همراه با آب آبیاری استفاده شد که شامل سطوح ۰/۵، ۸ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر از منبع کلراید سدیم بود (آبیاری گیاهان با آب گلخانه انجام شد و شوری آب گلخانه حدود ۰/۵ دسی زیمنس بود که به عنوان تیمار شاهد در نظر گرفته شد و گیاهان شاهد فقط با آب گلخانه آبیاری شدند و شوری حاصل از کلرید سدیم را دریافت نکردند) و از دو منبع کودی سولفات پتاسیم (۱ و ۲ درصد) و نانو پتاسیم (شرکت صدور احراق شرق، خضرا) با غلظت (۱و ۲ گرم بر لیتر) به صورت محلول‌پاشی برگی طی سه مرحله (پیش از اعمال تنش شوری، هفت روز بعد از اعمال تنش شوری مرحله اول و ۱۴ روز بعد از اعمال تنش شوری مرحله اول) انجام گرفت. تنش شوری طی سه مرحله با غلظت شوری ۴ دسی زمینس بر متر شروع و بعد از یک هفته با غلظت ۶ دسی زمینس بر متر و پس از یک هفته، شوری ۸ دسی زمینس بر متر اعمال شد و در نهایت با اضافه نمودن غلظت ۱۲ دسی زیمنس بر متر به صورت محلول به خاک پایان یافت. آزمایش به صورت فاکتوریل با چهار تکرار در قالب طرح به طور کامل تصادفی انجام شد و در آن سه سطح شوری، دو رقم پسته (اکبری و احمد آقایی) و دو منبع کودی هر کدام با دو غلظت مختلف در مرحله دانهالی مورد بررسی قرار گرفتند.

اندازه‌گیری کلروفیل کل

محتوای کلروفیل کل برگ‌ها با استفاده از دی متیل سولفوکساید (DMSO) اندازه‌گیری شد. برای این منظور ۱۰۰ میلی‌گرم از تکه‌های برگ (بدون رگبرگ) در داخل ارلن قرار گرفت و مقدار ۷ میلی‌لیتر از DMSO روی آن‌ها ریخته شد و ارلن‌ها به مدت ۶۰ دقیقه در دمای ۶۵ درجه سلسیوس درون دستگاه انکوباتور قرار داده شدند. سپس، عصاره صاف و بافت‌های برگ داخل ارلن‌ها دور ریخته شد و با افزودن DMSO حجم عصاره به ۱۰ میلی‌لیتر رسانده شد. در نهایت، با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (Epoch Microplate Spectrophotometer, Bio Tek Instruments, Inc., USA) جذب عصاره در طول موج ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر خوانده شد (۱۱).

اندازه‌گیری یون‌های سدیم، پتاسیم و کلر

میزان یون‌های سدیم و پتاسیم پس از خاکستر کردن ۰/۵ گرم از نمونه‌های گیاهی و اضافه کردن ۵ میلی‌لیتر اسید هیدروکلریک با آب مقطر داغ و رساندن به حجم ۵۰ میلی لیتر، به‌وسیله دستگاه شعله سنج[۱] (Jenway PEP7, ELE Instrument Co. Ltd) اندازه گیری شد و عدد به دست آمده در نمودار استاندارد قرار گرفت و در نهایت عدد بر حسب قسمت در میلیون بیان شد (۶). برای تعیین میزان کلر، ۰/۵ گرم پودر خشک شده برگ با ۰/۱۲ گرم اکسید کلسیم و آب مقطر تبدیل به خمیر شد و در کوره قرار گرفت تا خاکستر شود. سپس، ۱۵ میلی لیتر آب مقطر به آن اضافه و با کاغذ صافی شماره ۶۱۵ صاف شد و به حجم ۵۰ میلی لیتر رسانده شد. پس از اضافه نمودن ۵ قطره کرومات پتاسیم ۵٪ به مخلوط، با نیترات نقره ۰/۰۵ نرمال تیتر شد تا رسوب قرمز آجری دیده شود و با استفاده از فرمول زیر در صد کلر محاسبه گردید (۸) (g گرم نمونه گیاهی، N نرمالیته نیترات نقره).

$$\%Cl=\frac{(ml\ AgNO3-ml\ blank)\times N\ AgNO3\times 35.5\times 100}{g\ sample\times 1000}$$

اندازه‌گیری پرولین

برای اندازه گیری پرولین، ۰/۵ گرم از برگ پدر شده هر نمونه در ۵ میلی‌لیتر محلول آبی اسید سولفوسالیسیلیک ۳ درصد قرار داده شد و مخلوط حاصل در هاون چینی همگن شد. در مرحله بعد ۲ میلی‌لیتر از این محلول را با ۲ میلی‌لیتر معرف ناین هیدرین مخلوط نموده و ۲ میلی لیتر اسید استیک به هر لوله اضافه شد. نمونه‌ها به مدت یک ساعت در حمام بن ماری (مدل Gemmy Industrial Crop) در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس قرار گرفت و بی درنگ پس از خارج کردن از حمام به مدت ۱۵ دقیقه در یخ قرار داده شد. بعد از این مرحله به هر لوله آزمایش ۴ میلی‌لیتر تولوئن اضافه شد و از فاز رویی برای تعیین غلظت پرولین با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۲۰ نانومتر انجام شد (۵).

$$\frac{\text{میکرو مول}}{\text{گرم وزن تر}}=\frac{\text{پرولین میکرو گرم)}\times\text{تولوئن میلی لیتر})/115.5}{\text{نمونه}/5}$$

اندازه‌گیری مالون‌دی‌آلدئید

برای اندازه‌گیری مالون دی آلدئید ۰/۲ گرم بافت تر برگ با نیتروژن مایع ساییده شد. سپس، ۱ میلی‌لیتر محلول تری‌کلرواستیک اسید ۰/۱ درصد (w/v) به آن اضافه شد. نمونه‌ها با سرعت ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه به‌مدت ۵ دقیقه سانتریفیوژ شدند و از روشناور برای

۱- Flame photometer

اندازه‌گیری محتوای مالون‌دی‌آلدئید استفاده شد. به محلول شناور رویی ۴ میلی‌لیتر محلول تری‌کلرواستیک اسید ۲۰ درصد حاوی تیوباربیتوریک اسید ۰/۵ درصد اضافه شد و به‌خوبی مخلوط شد. نمونه‌ها به مدت ۱۵ دقیقه در حمام آب گرم با دمای ۹۵ درجه سلسیوس قرار گرفته، سپس به سرعت روی یخ سرد شدند. میزان مالون دی آلدئید با دستگاه اسپکتروفتومتر (Epoch Microplate Spectrophotometer, BioTek Instruments, Inc., USA) در طول‌موج ۵۳۲ نانومتر تعیین گردید و به‌صورت نانومول بر گرم وزن تر بیان شد (۲۰).

اندازه‌گیری پراکسیداسیون هیدروژن (H2O2)

برای اندازه گیری پراکسید هیدروژن، ۰/۵ گرم از نمونه برگ تر در هاون چینی حاوی نیتروژن مایع خرد و با ۱۰ میلی‌لیتر از تری‌کلرواستیک اسید ۵ درصد ، ۰/۲گرم زغال فعال و ۰/۱ گرم پلی وینیل پلی پیرولیدون (PVPP) حل شد. سپس به‌مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ (با سرعت ۱۸۰۰۰ دور در دقیقه) و قسمت رویی محلول جدا شد. مخلوط واکنش شامل ۰/۱ میلی‌لیتر از عصاره برگ، ۱/۹ میلی‌لیتر از ۰/۱ مولار بافر فسفات پتاسیم pH=7 و ۱ میلی‌لیتر معرف کلرومتریک (به نسبت حجمی ۱:۱) از ۰/۶ مولار اگزالات تیتانیوم فسفات و ۰/۶ میلی‌مولار ۴-۲ (2-pyridyazo) رسورسینول (disodium salt) که روزانه آماده شد، بود. دو میلی‌لیتر از مخلوط در داخل حمام آب گرم (۶۰ درجه سلسیوس) به‌مدت ۴۵ دقیقه قرار داده شد و در نهایت پراکسیدهیدروژن در طول موج ۵۸۰ نانومتر اندازه‌گیری شد (۱۷).

واکاوی داده‌ها

تجزیه واریانس داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS (نسخه۹/۴) صورت گرفت و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. برای رسم نمودارها نیز از نرم‌افزار Excel استفاده شد.

نتایج

کلروفیل کل

نتایج نشان داد که رقم اکبری مقدارکلروفیل کل بیشتری نسبت به احمدآقایی داشته است و در بین غلظت‌های مختلف شوری، شوری ۰/۵ دسی‌زیمنس بر متر (شاهد) بیش‌ترین کلروفیل کل و شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر کم‌ترین کلروفیل کل را داشت. نتایج مقایسه میانگین برهمکنش اثر رقم و شوری نشان داد که بیشترین میزان کلروفیل کل مربوط به رقم اکبری با شوری ۰/۵ دسی‌زیمنس بر متر و کمترین میزان کلروفیل کل نیز مربوط به رقم احمدآقایی با غلظت شوری ۱۲ دسی زیمنس بر متر بود که نسبت به سایر تیمارها تفاوت معنی‌دار داشت ($P <$ ۰/۰۵) (جدول ۲). نتایج نشان داد که بیشترین میزان کلروفیل کل مربوط به تیمار کود نانوپتاسیم ۲ میلی‌گرم بر لیتر بود؛ اگر چه با تیمار کودی نانوپتاسیم (۴ میلی‌گرم بر لیتر) و سولفات پتاسیم ۱ درصد تفاوت معنی‌داری نداشت. نتایج نشان داد که بیشترین میزان کلروفیل کل در غلظت شوری ۰/۵ دسی‌زیمنس بر متر با کود نانوپتاسیم ۲ میلی‌گرم بر لیتر به دست آمد که با غلظت شوری ۰/۵ دسی‌زیمنس بر متر به همراه کودهای نانوپتاسیم ۴ میلی‌گرم بر لیتر و سولفات پتاسیم یک درصد تفاوتی نداشت، اما نسبت به سایر تیمارها تفاوت معنی‌دار داشت و کم‌ترین میزان کلروفیل کل نیز مربوط به غلظت شوری ۱۲ دسی زیمنس بر متر با تیمار کود شاهد بود (جدول ۴).

جدول ۲- تأثیر سطوح مختلف شوری و رقم بر غلظت کلروفیل کل و میزان سدیم و پتاسیم ریشه.

Table 2- Effects of different salinity levels and cultivars on total chlorophyll concentration andsodium and potassium content of root.

	سدیم ریشه (٪) Root sodium (%)		کلروفیل کل (میلی‌گرم بر گرم وزن تر) Total chlorophyll (mg g $^{-1}$ FW)		پتاسیم ریشه (٪) Root potassium (%)	
شوری (دسی‌زیمنس بر متر) Salinity (dSm^{-1})	رقم احمد آقایی "Ahmad-Aghaei"	رقم اکبری "Akbari"	رقم احمد آقایی "Ahmad-Aghaei"	رقم اکبری "Akbari"	رقم اکبری "Akbari"	رقم احمد آقایی "Ahmad-Aghaei"
0.5	0.42 ± 0.161 ^{d}†	0.35 ± 0.161 ^{e}	1.62 ± 0.357 ^{b}	1.97 ± 0.357 ^{a}	1.26 ± 0.161 ^{a}	1.17 ± 0.161 ^{b}

8	0.58 ± 0.161 [b]	0.47 ± 0.174 [c]	1.11 ± 0.357 [c]	1.55 ± 0.361 [b]	0.86 ± 0.174 [c]	0.79 ± 0.161 [d]
12	0.63 ± 0.174 [a]	0.61 ± 0.239 [ab]	0.65 ± 0.361 [d]	1.18 ± 0.289 [c]	0.62 ± 0.239 [e]	0.59 ± 0.174 [e]

†در هر ستون، میانگین‌هایی که دارای حرف‌های مشابه هستند، در سطح احتمال ۵٪ آزمون چند دامنه‌ای دانکن تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند. داده‌ها شامل میانگین ± خطای استاندارد می‌باشند.

Means with the same letter(s) are not significantly different at 5% level of probability using Duncan's multiple range test. Data include mean ± standard error.

سدیم ریشه

نتایج نشان داد که بین رقم‌های مختلف، رقم احمدآقایی سدیم ریشه بیشتری نسبت به اکبری داشت که با هم تفاوت معنی‌دار داشتند. همچنین، در غلظت‌های مختلف شوری، در شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر بیشترین میزان سدیم ریشه به‌دست آمد و کمترین میزان سدیم ریشه نیز مربوط به غلظت ۰/۵ دسی‌زیمنس بر متر بود. نتایج نشان داد که رقم احمدآقایی با غلظت شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر، بیشترین میزان سدیم ریشه بود که با رقم اکبری با همین غلظت تفاوتی نداشت، اما نسبت به سایر تیمارها تفاوت معنی‌دار داشت. کم‌ترین میزان سدیم ریشه نیز مربوط به رقم اکبری با غلظت شوری ۰/۵ دسی‌زیمنس بر متر بود (جدول ۲). نتایج نشان داد که بر همکنش شوری و کوددهی بر میزان سدیم ریشه تأثیر معنی‌داری دارد؛ به طوری که در غلظت شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر و بدون کوددهی بیشترین میزان سدیم ریشه مشاهده شد و کم‌ترین میزان سدیم ریشه نیز مربوط به غلظت شوری ۰/۵ دسی‌زیمنس بر متر با کوددهی سولفات پتاسیم یک درصد بود که با تمامی غلظت‌های شوری ۰/۵ دسی‌زیمنس بر متر تفاوتی نداشت، اما نسبت به سایر تیمارها دارای تفاوت معنی‌دار بود (جدول ۴).

پتاسیم ریشه

نتایج نشان داد که رقم اکبری به‌طور معنی‌داری پتاسیم ریشه بیشتری نسبت به رقم احمدآقایی داشت. بین غلظت‌های مختلف شوری نیز مشاهده شد که شوری ۰/۵ دسی‌زیمنس بر متر (شاهد) دارای بیش‌ترین پتاسیم ریشه و شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر کم‌ترین پتاسیم ریشه را داشت. غلظت‌های مختلف شوری از نظر این صفت، با یکدیگر تفاوت معنی‌دار داشتند (جدول ۲). برهمکنش بین رقم و شوری نشان داد که بیشترین میزان پتاسیم ریشه نیز مربوط به رقم اکبری با غلظت شوری ۰/۵ دسی‌زیمنس بر متر بود که نسبت به سایر تیمارها تفاوت معنی‌داری داشت که رقم احمدآقایی با غلظت شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر کمترین میزان پتاسیم ریشه را داشت که با رقم اکبری با غلظت شوری ۱۲ دسی زیمنس بر متر تفاوتی نداشت، اما نسبت به سایر تیمارها تفاوت معنی‌دار داشت (جدول ۲). برهمکنش بین شوری و کوددهی نشان داد که بیشترین میزان پتاسیم ریشه نیز مربوط به غلظت شوری صفر و کود نانوپتاسیم ۴ میلی‌گرم بر لیتر بود که با غلظت شوری ۰/۵ دسی‌زیمنس بر متر به همراه کودهای نانوپتاسیم ۲ میلی‌گرم بر لیتر و سولفات پتاسیم یک درصد تفاوتی نداشت، اما نسبت به سایر تیمارها دارای تفاوت معنی‌دار بود و کمترین میزان پتاسیم ریشه در غلظت شوری ۱۲ دسی زیمنس بر متر با کوددهی شاهد به‌دست آمد (جدول ۴).

کلر ریشه

نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که رقم احمدآقایی کلر ریشه بیشتری نسبت به رقم اکبری داشت. بین غلظت‌های مختلف شوری نیز مشاهده شد که شوری ۰/۵ دسی‌زیمنس بر متر (شاهد) کم‌ترین کلر ریشه و شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر بیش‌ترین کلر ریشه را داشت (جدول ۲). برهمکنش تأثیر رقم و شوری بر کلر ریشه نشان داد که رقم احمدآقایی با غلظت شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر، بیشترین میزان کلر ریشه را داشت که نسبت به سایر تیمارها تفاوت معنی‌دار داشت. کمترین میزان کلر ریشه نیز مربوط به رقم اکبری با غلظت شوری صفر بود که با رقم اکبری با غلظت ۸ دسی زیمنس بر متر و رقم احمدآقایی با غلظت ۰/۵ دسی‌زیمنس بر متر تفاوتی نداشت، اما نسبت به سایر تیمارها دارای تفاوت معنی‌دار بود (جدول ۳). نتایج تیمارهای مختلف کوددهی نشان داد که بیشترین میزان کلر ریشه مربوط به کوددهی شاهد بود و کمترین میزان کلر ریشه مربوط به نانو پتاسیم یک درصد بود که با دیگر تیمارهای کوددهی دارای تفاوت معنی‌دار نبود (جدول ۵).

پرولین

نتایج نشان داد که رقم اکبری به طور معنی‌داری میزان پرولین بیشتری نسبت به رقم احمدآقایی داشت و بین غلظت‌های مختلف شوری نیز مشاهده شد که کم‌ترین و بیش‌ترین غلظت پرولین به ترتیب مربوط به شوری ۰/۵ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر بود (جدول ۳).

برهمکنش تأثیر رقم و شوری نشان داد که رقم احمدآقایی با غلظت شوری ۱۲ دسی زیمنس بر متر دارای بیش‌ترین میزان پرولین بود که با رقم اکبری در این غلظت شوری تفاوتی نداشت، اما نسبت به سایر تیمارها تفاوت معنی‌دار داشت (جدول ۳). نتایج تیمارهای مختلف کوددهی نشان داد که بیشترین و کمترین میزان پرولین به ترتیب مربوط به کوددهی نانوپتاسیم ۲ میلی‌گرم بر لیتر و شاهد بود (جدول ۵

جدول ۳- تأثیر سطوح مختلف شوری و رقم بر میزان کلر ریشه، میزان پرولین و میزان مالون دی‌آلدهید.

Table 3. Effects of different salinity levels and cultivars on root chlorine, proline, and malondialdehyde content.

شوری (دسی‌زیمنس بر متر) Salinity (dSm^{-1})	مالون دی‌آلدهید (نانومول بر گرم وزن تر) Malondialdehyde (nmol g^{-1}FW)		پرولین (میکرومول بر گرم وزن تر) Proline (µmol g^{-1}FW)		کلر ریشه (٪) Chlorine of root (%)	
	رقم احمد آقایی "Ahmad-Aghaei"	رقم اکبری "Akbari"	رقم احمد آقایی "Ahmad-Aghaei"	رقم اکبری "Akbari"	رقم احمد آقایی "Ahmad-Aghaei"	رقم اکبری "Akbari"
0.5	0.58 ± 0.161 e†	0.46 ± 0.161 f	27.59 ± 0.143 e	± 0.143 d 36.00	0.85 ± 0.161 d	± 0.161 d 0.78
8	1.17 ± 0.161c	0.90 ± 0.174 d	48.49 ± 0.143 c	± 0.394 bc 51.02	1.39 ± 0.161 b	± 0.174 d 0.85
12	1.66± 0.174 a	1.26 ± 0.239 b	56.67 0.394 a	± 0.323 ab 55.02	1.59 ± 0.174 a	± 0.239 c 1.21

در هر ستون ، میانگین‌هایی که دارای حروف مشابه هستند اختلاف با یکدیگر در سطح احتمال ۵٪ آزمون چند دامنه‌ای دانکن ندارند. داده‌ها شامل میانگین ± خطای استاندارد می‌باشند.

Means with the same letter (s) are not significantly different at 5% level using Duncan's multiple range test. Data include mean± standard error.

مالون دی آلدهید

نتایج نشان داد که رقم احمدآقایی به طور معنی‌داری میزان مالون دی آلدهید بیشتری نسبت به رقم اکبری داشت. بین غلظت‌های مختلف شوری نیز تفاوت معنی‌داری مشاهده شد به گونه‌ای که شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر بیشترین میزان مالون دی آلدهید و غلظت ۰/۵ دسی‌زیمنس بر متر کمترین میزان مالون دی آلدهید را داشت (جدول ۳). اثر برهمکنش رقم و شوری بر غلظت مالون دی آلدهید نشان داد که رقم احمدآقایی با غلظت شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر بیشترین میزان مالون دی آلدهید را داشت. کم‌ترین میزان مالون دی آلدهید نیز مربوط به رقم اکبری با غلظت شوری ۰/۵ دسی‌زیمنس بر متر بود (جدول ۳). نتایج اثر برهمکنش رقم و کوددهی نشان داد که رقم احمدآقایی با تیمار شاهد دارای بیشترین میزان مالون دی آلدهید بود و کم‌ترین میزان مالون دی آلدهید نیز مربوط به رقم اکبری با تیمار نانوپتاسیم ۲ میلی‌گرم بر لیتر بود که با رقم اکبری با تیمارهای نانوپتاسیم ۴ میلی‌گرم بر لیتر و سولفات پتاسیم یک درصد تفاوتی نداشت، اما نسبت به سایر تیمارها تفاوت معنی‌دار داشت (جدول ۶).

.

جدول ۴- تأثیر سطوح مختلف شوری و منابع کودی بر میزان کلروفیل کل، سدیم و پتاسیم ریشه.

Table 4. Effects of salinity levels and fertilizer sources on total chlorophyll content, root sodium and potassium.

	پتاسیم ریشه (٪) Root potassium (%)			سدیم ریشه(٪) Root sodium (%)			کلروفیل کل(میلی‌گرم بر گرم وزن تر) Total chlorophyll (mg g $^{-1}$ FW)		
شوری (دسی‌زیمنس بر متر) Salinity (dSm^{-1})	12	8	0.5	12	8	0.5	12	8	0.5
بدون کود No fertilizer	0.42 ± 0.361^{f}†	0.21 ± 0.289^{e}	1.13 ± 0.357^{c}	0.77 ± 0.361^{a}	0.67 ± 0.289^{b}	0.39 ± 0.357^{gh}	0.51 ± 0.394^{j}	0.96 ± 0.323^{hi}	1.64 ± 0.143 b
نانوپتاسیم (۲ میلی‌گرم بر لیتر) Nano-potassium (2 mg L^{-1})	0.64 ± 0.289^{e}	0.82 ± 0.357^{d}	1.24 ± 0.361^{ab}	0.58 ± 0.289^{c}	0.44 ± 0.357^{fg}	0.40 ± 0.361^{gh}	1.17 ± 0.323^{fg}	1.56 ± 0.143^{bc}	1.94 ±0.394^{a}
نانوپتاسیم (۴ میلی‌گرم بر لیتر) Nano-potassium (4 mg L^{-1})	0.66 ± 0.357^{e}	0.84 ± 0.357^{d}	1.29 ± 0.289^{a}	0.59 ± 0.357^{c}	0.52 ± 0.357^{de}	0.38 ± 0.289^{gh}	1.08 ± 0.143^{gh}	1.49 ± 0.143^{cd}	1.85 ± 0.323^{a}
سولفات پتاسیم ۱٪ Potassium sulfate (1%)	0.65 ± 0.357^{e}	0.87 ± 0.361^{d}	1.22 ± 0.357^{ab}	0.58 ± 0.357^{c}	0.49 ± 0.361^{ef}	0.36 ± 0.357^{h}	0.97 ± 0.143^{h}	1.38 ± 0.394^{de}	1.85 ± 0.143^{a}
سولفات پتاسیم ۲٪ Potassium sulfate (2%)	0.68 ±0.361^{e}	0.89 ± 0.357^{d}	1.20 ± 0.361^{bc}	0.57 ± 0.361^{cd}	0.51 ± 0.357^{de}	0.37 ± 0.361^{h}	0.83 ± 0.394^{i}	1.26 ± 0.143^{ef}	1.69 ± 0.394^{b}

Means with the same letter (s) are not significantly different at 5% level using Duncan's multiple range test. Data include mean ± standard error.

†در هر ستون ، میانگین‌هایی که دارای حروف مشابه هستند اختلاف معنی‌داری با یکدیگر در سطح احتمال ۵٪ آزمون چند دامنه‌ای دانکن ندارند. داده‌ها شامل میانگین ± خطای استاندارد می‌باشند

جدول ۵- تأثیر منابع مختلف کودی بر میزان کلر ریشه و پرولین دو رقم پسته.

Table 5. Effect of different fertilizer resources on root chlorine and proline content of two pistachio cultivars.

تیمار کودی Fertilizer treatment	کلر ریشه Chlorine of root (%)	پرولین Proline (µmol.g^{-1}fw)
بدون کود No fertilizer	0.91^{a}	*34.03^{d}
نانوپتاسیم (۲ میلی‌گرم بر لیتر) Nano-potassium (2 mg L^{-1})	0.68^{b}	52.14^{a}
نانوپتاسیم (۴ میلی‌گرم بر لیتر) Nano-potassium (4 mg L^{-1})	0.77^{b}	45.59^{b}
سولفات پتاسیم ۱٪ Potassium sulfate (1%)	0.75^{b}	50.47^{ab}
سولفات پتاسیم ۲٪ Potassium sulfate (2%)	0.77^{b}	46.75^{bc}

در هر ستون ، میانگین‌هایی که دارای حروف مشابه هستند اختلاف معنی‌داری با یکدیگر در سطح احتمال ۵٪ آزمون چند دامنه‌ای دانکن ندارند. داده‌ها شامل میانگین ± خطای استاندارد می‌باشند.

Means with the same letter (s) are not significantly different at 5% level using Duncan's multiple range test. Data include mean ± standard error.

جدول ۶- تأثیر غلظت‌های مختلف کوددهی و رقم بر میزان مالون دی‌آلدهید.

Table 6. Effect of different fertilizer resources and cultivars on malondialdehyde content.

رقم Cultivar	منابع کودی Fertilizer resources	مالون دی آلدهید *Malondialdehyde* (nmol g^{-1}FW)
اکبری "Akbari"	بدون کود No fertilizer	1.02 ± 0.143 ^{d}†
	نانوپتاسیم (۲ میلی‌گرم بر لیتر) Nano-potassium (2 mg L^{-1})	0.79 ± 0.394 ^{f}
	نانوپتاسیم (۴ میلی‌گرم بر لیتر) Nano-potassium (4 mg L^{-1})	0.84 ± 0.323 ^{ef}
	سولفات پتاسیم ۱٪ Potassium sulfate (1%)	0.83 ± 0.143 ^{f}
	سولفات پتاسیم ۲٪ Potassium sulfate (2%)	0.89 ± 0.143 ^{e}
احمدآقایی "Ahmad-Aghaei"	بدون کود No fertilizer	1.38 ± 0.323 ^{a}
	نانوپتاسیم (۲ میلی‌گرم بر لیتر) Nano-potassium (2 mg L^{-1})	1.02 ± 0.323 ^{d}
	نانوپتاسیم (۴ میلی‌گرم بر لیتر) Nano-potassium (4 mg L^{-1})	1.07 ± 0.143 ^{cd}
	سولفات پتاسیم ۱٪ Potassium sulfate (1%)	1.08 ± 0.394 ^{bc}
	سولفات پتاسیم ۲٪ Potassium sulfate (2%)	1.14 ± 0.394 ^{b}

†در هر ستون ، میانگین‌هایی که دارای حروف مشابه هستند اختلاف معنی‌داری با یکدیگر در سطح احتمال ۵٪ آزمون چند دامنه‌ای دانکن ندارند. داده‌ها شامل میانگین ± خطای استاندارد می‌باشند.

Means with the same letter (s) are not significantly different at 5% level using Duncan's multiple range test. Data include mean ± standard error.

پراکسید هیدروژن (H_2O_2)

برهمکنش بین رقم، سطوح مختلف شوری و تیمارهای کوددهی بر میزان H_2O_2 نشان داد که رقم احمدآقایی با غلظت شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر و تیمار کود شاهد، دارای بیشترین میزان H_2O_2 بود که نسبت به سایر تیمارها تفاوت معنی‌دار داشت. هم‌چنین، کم‌ترین میزان H_2O_2 مربوط به رقم اکبری با غلظت شوری ۰/۵ دسی‌زیمنس بر متر و تمام سطوح تیمارهای کودی بود (جدول ۷).

جدول۷- تأثیرغلظت‌های مختلف کوددهی، رقم، و شوری بر میزان H_2O_2.

Table 7. Effect of of different fertilizer resources، cultivars and salinity on H_2O_2 content.

		H_2O_2 (µmol g^{-1}FW)				
رقم cultivar	شوری Salinity (dsm^{-1})	بدون کود No fertilizer	نانوپتاسیم Nano-potassium (2 mg L^{-1})	نانوپتاسیم Nano-potassium (4 mg L^{-1})	سولفات پتاسیم Potassium sulfate (1%)	سولفات پتاسیم Potassium sulfate (2%)
اکبری "Akbari"	0.5	0.58 ± 0.13 m†	0.51 ± 0.11 m	0.47 ± 0.02m	0.41 ± 0.05m	0.51 ± 0.09 m
	8	2.83 ± 0.14 bc	1.32 ± 0.14 kl	1.60 ± 0.19 ijk	1.15 ± 0.06 l	1.42 ± 0.23 jkl
	12	3.11 ± 0.16 b	1.97 ± ۰/۱۷ fg	1.94 ± 0.06 fgh	1.71 ± 0.09 g-j	± 0.11 ghi 1.83
احمدآقایی "Ahmad-Aghaei"	0.5	0.60 ± 0.04 m	0.53 ± 0.03 m	0.55 ± 0.04m	0.51 ± 0.03 m	0.61 ± 0.08 m
	8	2.32 ± 0.15 de	1.54 ± 0.03 ijk	1.69 ± 0.11 g-j	1.65 ± 0.15 g-j	± 0.13 h-k 1.63
	12	3.83 ± 0.2 a	2.22 ± 0.04 ef	1.65 ± 0.13 cd	2.49 ± 0.12 de	± 0.12cd e 2.53

† در هر ستون، میانگین‌هایی که دارای حروف مشابه هستند اختلاف معنی‌داری با یکدیگر در سطح احتمال ۵٪ آزمون چند دامنه‌ای دانکن ندارند. داده‌ها شامل میانگین ± خطای استاندارد می‌باشند.

Means with the same letter (s) are not significantly different at 5% level using Duncan's multiple range test. Data include mean ± standard error.

بحث

با توجه به نتایج پژوهش حاضر مشخص شد که کاربرد کودهای حاوی پتاسیم در رقم‌های احمدآقایی و اکبری پسته زیر تنش شوری، از راه افزایش غلظت پتاسیم و کاهش غلظت سدیم، سبب بهبود ویژگی‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی آن‌ها شد. پتاسیم با افزایش میزان پرولین برگ که در این بررسی نیز تأیید شد و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی کسیدان، تجمع گونه‌های فعال اکسیژن را کاهش داد و در نتیجه به پایداری بیشتر رنگدانه‌های فتوسنتزی در تنش شوری منجر شد (۷). نتایج پژوهش حاضر نشان داد که رقم اکبری کلروفیل کل بیشتری نسبت به رقم احمدآقایی داشت. شاخص کلروفیل به عنوان یک نشانگر بیوشیمیایی نشان‌دهنده میزان تحمل گیاهان به تنش شوری است؛ به گونه‌ای که در گیاهان حساس، میزان کلروفیل کاهش می‌یابد. به طور کلی کاهش این رنگدانه به خاطر کاهش در ساخت آن یا افزایش سرعت تخریب آن در یاخته است. گیاهان در رویارویی با تنش شوری جهت مقابله با پتانسیل اسمزی خارج یاخته‌ای و حفظ فشار تورژسانس خود، اقدام به انباشت متابولیت‌های محلول سازگار مثل پرولین و قندهای محلول می‌کنند (۱۹).

کاهش کلروفیل ممکن است به دلیل تخریب کلروپلاست، تغییر نسبت لیپید به پروتئین و افزایش فعالیت آنزیم‌های کلروفیلاز و روبیسکو باشد. اثر سمیت بعضی یون‌ها در شرایط تنش شوری از فعالیت آنزیمی و ساخت کلروفیل در یاخته جلوگیری می‌کند.

مصرف پتاسیم در شرایط شوری، نسبت سدیم به پتاسیم و سمیت سدیمی را تا حدودی کاهش می‌دهد و سطح کلروفیل را به طور معنی‌داری افزایش می‌دهد و منجر به افزایش تحمل گیاه به شوری می‌شود (۲۷).

با توجه به نتایج، رقم اکبری با کاربرد کود نانو پتاسیم دو گرم بر لیتر در شوری ۰/۵ دسی‌زیمنس بر متر دارای کمترین سدیم ریشه بود. بیشترین پتاسیم ریشه در رقم اکبری در شوری ۰/۵ دسی‌زیمنس بر متر و کاربرد کودهای پتاسیمی دیده شد. کم‌ترین میزان کلر برگ نیز مربوط به رقم احمدآقایی با غلظت شوری ۰/۵ دسی‌زیمنس بر متر بود که کاربرد کودهای پتاسیمی آن را بهبود بخشید. رقم احمدآقایی در بالاترین سطح شوری، کلر ریشه بیشتری داشت که کاربرد کودهای پتاسیمی آن را تعدیل کرد. به طور کلی رقم اکبری نسبت به احمد آقایی به شوری متحمل‌تر بوده و کاربرد کودهای پتاسیمی توانسته شوری خاک را تعدیل نماید. در پژوهشی روی درخت لیلکی، شوری مقدار پتاسیم برگ و ریشه گیاه را کاهش ولی مقدار سدیم را افزایش داد (۲۴). پتاسیم یکی از مهم‌ترین عناصری است که در ایجاد تعادل آنیون و کاتیون درون یاخته نقش دارد. همچنین، این عنصر اثر معنی‌داری در جذب سایر عناصر از ریشه دارد و در رفع آثار سوء عدم تعادل بعضی از عناصر غذایی در خاک کمک می‌کند (۱۰). زمانی که گیاه در معرض تنش شوری قرار می‌گیرد، میزان سدیم اندام هوایی و ریشه افزایش پیدا می‌کند. این امر به دلیل وجود مقادیر بالای Na^+ در محیط و جایگزینی این یون به جای K^+ است.

در شرایط تنش شوری Na^+ با K^+ رقابت کرده و جذب سایر یون‌های غذایی به ویژه جذب پتاسیم را کاهش می‌دهد (۱۸) که این امر، سبب کاهش نسبت سدیم به پتاسیم برگ در شرایط شوری خاک می‌شود که نتایج پژوهش حاضر نیز در این راستاست. در شرایط شور، فراوانی یون سدیم در سطح ریشه از جذب عنصر غذایی پتاسیم جلوگیری می‌کند، زیرا از لحاظ شیمیایی سدیم و پتاسیم به یکدیگر شبیه‌اند. کاهش پتاسیم در شرایط تنش شوری می‌تواند به دلیل رقابت سدیم بر سر مکان‌های اتصال به ناقل‌های غشای پلاسمایی و یا نشت پتاسیم به دلیل عدم ثبات غشای پلاسمایی باشد. علت کاهش پتاسیم ریشه در غلظت‌های بالای کلرید سدیم، رقابت بین سدیم و پتاسیم در جذب توسط ریشه است؛ در حالی‌که غلظت پتاسیم اندام هوایی با افزایش کلرید سدیم افزایش یافت، این موضوع بیانگر قدرت انتخابی بیشتر پسته در انتقال پتاسیم به اندام‌های هوایی در مقایسه با سدیم است که به‌عنوان یکی از ساز و کارهای تحمل به شوری ارزیابی می‌شود (۱۳).

در گیاهانی که در تنش شوری قرار می‌گیرند، افزایش غلظت یون سدیم منجر به ایجاد رادیکال‌های آزاد بیشتر و عدم تعادل اسمولیت‌ها می‌شود. برای جاروب رادیکال‌های آزاد اضافی و تنظیم وضعیت اسمزی مقدار آنتی اکسیدان‌های آنزیمی و غیر آنزیمی مانند پرولین و فنول افزایش می‌یابد. بنابراین، گیاه می‌تواند بیشتر به این سیستم دفاعی تکیه کند و تنش شوری را تحمل کند و راحت‌تر زنده بماند. تنش شوری باعث جذب سدیم و کلر می‌شود و غلظت پتاسیم کاهش می‌یابد (۲۱). گزارش شده است که غلظت یون سدیم و پتاسیم در اندام‌های مختلف پایه‌های پسته با افزایش سطح شوری افزایش یافت، به‌طوری که رقم اکبری غلظت سدیم کمتری در برگ‌ها داشت و UCB-1 غلظت بیشتری پتاسیم در برگ‌ها داشت. تنش شوری اثر معنی‌داری روی غلظت کلر نداشت، این رفتار یون‌ها در پایه‌های پسته در شرایط شوری پیش از این نیز گزارش شده است (۲۱). نتایج پژوهش حاضر نشان داد که بیشترین میزان پرولین مربوط به کوددهی نانوپتاسیم ۲ گرم بر لیتر بود که با تیمارهای شاهد، نانوپتاسیم ۴ گرم بر لیتر و سولفات پتاسیم ۲٪ تفاوت معنی‌داری داشت. افزایش سطح پرولین در شرایط تنش شوری به این دلیل است که پرولین اسمولیت سازگاری است که اکسیژن‌های آزاد تولیدشده در شرایط تنش‌های محیطی را حذف و از مولکول‌های بزرگ حفاظت می‌نماید. پرولین نقش کلیدی در تنظیم فشار اسمزی و حفاظت غشای یاخته‌ای ناشی از آسیب‌های وارده را دارد که با جذب رادیکال‌های آزاد نقش خود را ایفا می‌نماید (۴، ۶). کاربرد برگی سولفات پتاسیم در پژوهش حاضر با تأثیر بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی ممکن است منجر به افزایش غلظت پرولین در برگ دو رقم پسته تیمارشده با این عنصر در شرایط تنش شوری شده باشد. Fozouni و همکاران (۱۰) گزارش کردند که پتاسیم در زمان تنش‌های محیطی باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان شده و از این راه باعث کاهش رادیکال‌های آزاد تولید شده در شرایط تنش شوری می‌شود و در نهایت مانع از خسارت رادیکال‌های آزاد بر محتوای پرولین می‌شود. همچنین، آن‌ها گزارش کردند که کاربرد پتاسیم در شرایط تنش شوری باعث افزایش محتوای پرولین در گیاه آفتابگردان شد. افزایش غلظت پرولین ممکن است به دلیل وجود پیش ماده مشترک با کلروفیل یعنی گلوتامین باشد که در شرایط تنش برای تعدیل اسمزی، پرولین بیشتری ساخته شده و از ساخت کلروفیل کاسته شده است. پرولین داخل یاخته که

در مدت تنش انباشته شده است، تحمل به تنش را موجب می‌شود و همچنین ذخیره‌ای برای نیتروژن آلی در دوران بهبودی پس از تنش است (۱۰).

در آزمایش حاضر، رقم احمدآقایی دارای مالون دی آلدهید بیشتری نسبت به رقم اکبری بود و رقم احمدآقایی با تیمار کوددهی شاهد دارای بیشترین میزان مالون دی آلدهید بود. کم‌ترین میزان مالون دی آلدهید نیز مربوط به رقم اکبری با تیمار نانوپتاسیم ۲ میلی‌گرم بر لیتر بود. مالون دی آلدهید محصول تجزیه اسیدهای چرب غیراشباع و هیدروکسیدها است و به عنوان یک نشانگر برای پراکسید لیپیدی به کار می‌رود (۱۴) و تمایل به تجمع بیشتری در اثر تنش شوری نشان می‌دهد (۱۲). افزایش نمک باعث ایجاد تنش اکسیداتیو در یاخته‌ها و پدید آمدن اختلال در اعمال فیزیولوژیکی یاخته می‌شود. این تنش ثانویه به علت ایجاد رادیکال‌های آزاد اکسیژنی است که در درون یاخته تولید می‌شود. رادیکال‌های آزاد موجود در یاخته باعث صدمه به لیپیدها و اسیدهای چرب غشاء شده و رادیکال‌های لیپید و پراکسی و هیدروپراکسی تولید می‌کنند. رادیکال‌های جدید تولید شده می‌توانند به واکنش‌های اکسیداسیون لیپیدها سرعت بخشند (۱۴). نتایج این پژوهش با نتایج Raoufi و همکاران (۲۱) که بیان کردند محتوای پرولین، محتوای فنولی، پراکسیداسیون لیپیدها، فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی و محتوای سدیم برگ با افزایش شوری افزایش یافته، همخوانی دارد. در شرایط تنش شوری گیاهان اغلب محتوای پرولین را افزایش می‌دهند و پرولین منبعی از انرژی و نیتروژن را ارائه می‌دهد که می‌توانند پروتئین ساختاری و لیپیدهای غشای یاخته را در برابر آسیب‌های گونه‌های آزاد اکسیژن محافظت کنند. بنابراین، غلظت بالای پرولین به عنوان بخشی از سیستم آنتی‌اکسیدانی می‌تواند پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی را کاهش دهد که با غلظت کمتر مالون دی آلدهید نشان داده می‌شود (۲۰). در این پژوهش رقم اکبری تحمل به شوری بالاتری داشت که با یافته‌های Raoufi و همکاران (۲۲) همسو است. در این پژوهش رقم احمدآقایی با غلظت شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر و تیمار کود شاهد دارای بیشترین میزان H_2O_2 بود و کم‌ترین میزان H_2O_2 نیز مربوط به رقم اکبری با غلظت شوری ۰/۵ دسی‌زیمنس بر متر و تیمار کودی سولفات پتاسیم یک درصد بود. در این پژوهش، شوری سبب تولید پراکسید هیدروژن در ارقام پسته شد. در تنش‌های شوری شدید که سمیت‌زدایی پراکسید هیدروژن صورت نمی‌گیرد، منجر به واکنش هابر- ویز[۱]، تولید رادیکال‌های هیدروکسیل و عدم پایداری ماکرومولکول‌های پروتئین و چربی می‌شود (۲۶). کاربرد کودهای سولفات و نانو پتاسیم سبب کاهش پر اکسید هیدروژن در محیط شور می‌شود.

نتیجه گیری

نتایج حاصل نشان داد که ارقام پسته از نظر بیشتر ویژگی‌های مورد مطالعه با یکدیگر تفاوت معنی‌دار دارند که این نشان‌دهنده تنوع موجود در بین ارقام و واکنش متفاوت این ارقام نسبت به شرایط تنش شوری است. کودهای نانو پتاسیم بیشترین تأثیر را بر ویژگی‌های مورد بررسی در پسته داشت. به‌نظر می‌رسد، بهترین و مناسب‌ترین غلظت کوددهی، کود نانوپتاسیم با غلظت دو گرم بر لیتر برای کاهش اثر تنش شوری بود. رقم اکبری نسبت به رقم احمدآقایی واکنش بهتری نسبت به تنش و کوددهی پتاسیم نشان داد.

منابع Reference

1. Adhikari, B., S.K. Dhungana, I.D. Kim and D.H. Shin. 2020. Effect of foliar application of potassium fertilizers on soybean plants under salinity stress. J. Saudi Soc. Agric.Sci. 19:261-269.
2. Akram, M.S., M. Ashraf and N.A. Akram. 2009. Effectiveness of potassium sulfate in mitigating salt-induced adverse effects on different physio-biochemical attributes in sunflower (*Helianthus annuus* L.). Flora-Morphology, Distribution, Func. Ecol. Plants. 204: 471-483.
3. Amjad, M., Akhtar, J., Haq, M. A. U., Imran, S., and S. E. Jacobsen. 2014. Soil and foliar application of potassium enhances fruit yield and quality of tomato under salinity. Turkish J. Biolo. 38(2), 208-218.
4. Arshadullah, M., Ali, A., Hyder, S. I., and, I. A. Mahmood 2014. Effect of different levels of foliar application of potassium on Hysun-33 and Ausigold-4 sunflower (*Helianthus annuus* L.) cultivars under salt stress. Biolog. Sci.-PJSIR, 57(1), 1-4.
5. Bates, L.S., R.P. Waldren and I.D. Teare. 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. Plant Soil. 39:205-207.

۱- Haber-Weiss

6. Bybordi, A. 2012. Study effect of salinity on some physiologic and morphologic properties of two grape cultivars. J. Life Sci. 9:1092-1101.
7. Cakmak, I. 2005. The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants. J. Plant Nut. Soil Sci. 168: 521-530.
8. Chapman, H. D. and P.F. Pratt. 1982. Methods of Plant Analysis. I: Methods of Analysis for Soils, Plants and Water. Chapman Publishers, Riverside, CA. pp. 170.
9. Cui, H., C. Sun, Q. Liu, J. Jiang and W.GU. 2006. Applications of nanotechnology in agrochemical formulation, perspectives, challenges and strategies. Chinese Acad. Agric.Sci. 1-6.
10. Fozouni, M., N. Abbaspour and H. Doulati Baneh. 2012. Short term response of grapevine grown hydroponically to salinity: Mineral composition and growth parameters. Vitis.51: 95-101.
11. Hiscox, J. T. and G. Israelstam. 1979. A method for the extraction of chlorophyll from leaf tissue without maceration. Canadian J. Bot. 57:1332-1334.
12. Karimi, R. 2017. Potassium-induced freezing tolerance is associated with endogenous abscisic acid, polyamines and soluble sugars changes in grapevine. Sci. Hortic. 215:184-194.
13. Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. Academic Pres.500p.
14. Mayne, S.T. 2013. Oxidative stress, dietary antioxidant supplements, and health: is the glass half full or half empty. Amer. Assoc. Cancer Res. 2145-2147.
15. Mozaffari, V. and M.J. Malakouti. 2006. Responses of badami-zarand pistachio rootstock and die-back disease (*Paecilomyces variotii*) in different Na/K and salinity ratios under greenhouse conditions. Inter. Hort. Cong. Exhib.74-74.
16. Munns, R., and M. Tester. 2008. Mechanisms of salinity tolerance. Ann. Revi.Plant Biol. 59:651-681.
17. Patterson, B. D., E. A. MacRae and I. B Ferguson.1984. Estimation of hydrogen peroxide in plant extracts using titanium (IV). Anal. Biochem. 139:487-492.
18. Parida, A. K. and A. B. Das. 2005. Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. Ecotoxic. Environ. Safety. 60: 324-349.
19. Rahneshan, Z., F. Nasibi and A.A. Moghadam. 2018. Effects of salinity stress on some growth, physiological, biochemical parameters and nutrients in two pistachio (*Pistacia vera* L.) rootstocks. J. Plant Interact. 13:73-82.
20. Rao, K. M. and T.V.S. Sresty. 2000. Antioxidative parameters in the seedlings of pigeonpea (*Cajanus cajan* L. Millspaugh) in response to Zn and Ni stresses. Plant Sci. 157:113-128.
21. Raoufi, A., M. Rahemi, H. Salehi and M. Pessarakli. 2020a. *Pistacia vera* L. genotypes; a potential rival for UCB-1 rootstock for cultivating under salt stress conditions. Biocat. Agric.Biotec. 25:101515.
22. Raoufi, A., M. Rahemi and M. Akbari. 2020b. Glycerol foliar application improves salt tolerance in three pistachio rootstocks. J. Saudi Soc. Agric. Sci.19:426-437.
23. Raoufi, A., M. Rahemi, H. Salehi and A. Javanshah 2019. Selecting high-performance rootstocks for pistachio cultivars under salinity stress based on their morpho-physiological characteristics. Inter. J. Fruit Sci. 1-19
24. Razavizadeh, R. and N. Mohagheghiyan. 2015. An investigation of changes in antioxidant enzymes activities and secondary metabolites of thyme (*Thymus Vulgaris*) seedlings underin vitro salt stress. Iranian J. Plant Biol. 26: 41-58.
25. Siddiqui, M.H., F. Mohammad and M.N. Khan. 2009. Morphological and physio-biochemical characterization of Brassica juncea L. Czern. & Coss. Genotypes under salt stress. J. Plant Interact. 4: 67-80.
26. Taiz, L., E. Zeiger, I.M. Møller and A. Murphy. 2015. Plant physiology and development. Sinauer Associates. Inc., Sunderland.
27. Yildirim, E., H. Ü. Karlidag and M. Turan. 2009. Mitigation of salt stress in strawberry by foliar K, Ca and Mg nutrient supply. Plant Soil Environ. 55:213-221.
28. Zaki, N. M., Hassanein, M. S., Amal, G. A., Ebtsam, A., and M. M. Tawfik. 2014. Foliar application of potassium to mitigate the adverse impact of salinity on some sugar beet varieties. 2: Effect on yield and quality. Middle East Journal of Agriculture Research. 3(3), 448-460.

Iranian Journal of Horticultural Science and Technology 23 (4): 555-566 (2022)
Research article

Improving the Physiological and Biochemical Properties of Two Pistachio Cultivars by Application of Potassium Sulfate and Nanopotassium Fertilizers under Salinity Stress

M. H. Movahedi, S. Eshghi, M. Rahemi*, A. Raoufi and S. Sedaghat[1]

In order to evaluate the effects of potassium sulfate and nanopotassium fertilizers on two pistachio cultivars under salinity stress a factorial experiment was conducted in a completely randomized design with four replications. Treatments were three levels of salinity (0.5, 8 and 12 dSm^{-1}) and potassium sulfate fertilizer (1 and 2%) and nano–potassium fertilizer (1 and 2 g L^{-1}). The results showed that Akbari cultivar had the highest total chlorophyll, root potassium and proline contents compared with AhmadAghaei cultivar. The highest chloropyll conten was observed in Akbari cultivar under 0.5 dSm^{-1} NaCl by application of 2 g L^{-1} nano–potassium fertilizer. The lowest root sodium content was belonged to Akbari cultivar at 0.5 dSm^{-1} salinity stress with application of 1% sulfate potassium fertilizer. The minimum and maximunm content of proline was related to the salinity of 0.5 dsm^{-1} in AhmadAghaei cultivar and 12 dSm^{-1} in Akbari cultivar, respectively. The highest proline content was obtained by application of 2 g L^{-1} nano–potassium fertilizer. Application of potassium fertilizers reduced the adverse effects of salinity on pistachio seedlings.

Keywords: Chlorine, Chlorophyll, Malondialdehyde, Proline, Sodium.

1. Former M.Sc. Student, Professors, and Former Ph.D. StudentsDepartment of Horticultural Science, School of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran.
*Corresponding Author, Email: (rahemi@shirazu.ac.ir).