



"مقاله پژوهشی"

نقش قارچ اندوفیت *Penicillium chrysogenum* در گیاه گوجه‌فرنگی تحت تنش شوری

سهیلا آقائی درگیری^۱، داود صمصام‌پور^۲، مجید عسکری سیاهویی^۳ و عبدالنبی باقری^۴

۱- دکتری، گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

۲- دانشیار گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران (نویسنده مسؤل: Samsampoor@hormozgan.ac.ir)

۳- دانشیار مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی هرمزگان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، بندرعباس، ایران

۴- استادیار مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی هرمزگان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، بندرعباس، ایران

تاریخ دریافت: ۹۹/۱۰/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۲/۲۹

صفحه: ۸۴ تا ۹۴

چکیده

شوری یکی از مهم‌ترین تنش‌های غیر زیستی است که می‌تواند اثرات مخرب شدیدی روی رشد گیاهان داشته باشد. در این پژوهش تاثیر قارچ اندوفیت *Penicillium chrysogenum* روی بهبود صفات کمی و بیوشیمیایی گیاه گوجه‌فرنگی تحت تنش شوری (تیمار آب چاه شور با غلظت‌های مختلف صفر، ۴، ۶ و ۸ دسی‌زیمنس بر متر) به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانه دانشگاه هرمزگان بررسی شد. صفات مورد مطالعه شامل ارتفاع گیاه، وزن خشک ریشه، غلظت رنگدانه‌ها، محتوای نسبی آب برگ، پرولین، قندهای محلول، مالون دی‌آلدئید و پراکسید هیدروژن بود. نتایج نشان داد که گرچه تنش شوری باعث کاهش معنی‌دار ارتفاع گیاه، وزن خشک ریشه، کلروفیل *a*، کلروفیل *b*، کلروفیل کل، کاروتنوئید و محتوای نسبی آب برگ شد؛ اما تلقیح بوته‌های گوجه‌فرنگی با اندوفیت، باعث افزایش معنی‌دار این صفات و تقلیل اثرات منفی تنش شوری شد. حضور اندوفیت در برابر عدم حضور آن در تنش شوری (۸ دسی‌زیمنس بر متر) به میزان ۲۶/۶۶، ۳۰/۴۳، ۲۱/۷۲ و ۸/۴۷ درصد به ترتیب باعث افزایش صفات پرولین، قندهای محلول، مالون دی‌آلدئید و پراکسید هیدروژن شد. نتایج موجود نشان از پتانسیل بالای قارچ اندوفیت *Penicillium chrysogenum* در افزایش رشد به ویژه در شرایط تنش شوری دارد. از این قابلیت می‌توان در کاهش محدودیت کشت در برخی مناطق به دلیل لب شور بودن آب استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: پراکسید هیدروژن، پرولین، تنش شوری، کاروتنوئید، کلروفیل، مالون دی‌آلدئید

مقدمه

محافظة کننده‌های اسمولیتی مانند پرولین و قندهای محلول می‌توانند در داخل گیاهان تحت تنش شوری تجمع یابند و از عدم تعادل یونی و اسمزی جلوگیری کنند (۲۳). شوری تاثیر آشکاری بر پراکسیداسیون لیپید (MDA) غشای پلاسما دارد، که نشانه‌ای از آسیب و نشت غشا در شرایط تنش شوری است (۷). تولید بیشتر گونه‌های اکسیژن فعال (ROS) مانند پراکسید هیدروژن (H_2O_2) در کلروپلاست‌های گیاهان تحت تنش شوری توصیف شده است (۴۰). اصلاح سنتی گیاهان و استفاده از تکنیک‌های پیشرفته اصلاح گیاهان دو روش کاملاً شناخته شده برای تولید وارته‌های گیاهی مقاوم به شوری است که گزینه اول بسیار زمان‌بر بوده و گزینه دوم هم مستلزم صرف هزینه‌های فراوان می‌باشد. لذا شناسایی و به کارگیری مکانیسم‌های ارزان و کاربردی، امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. استفاده از اندوفیت‌های تحریک کننده رشد گیاهان، می‌تواند یکی از راه‌های جایگزین برای بازیابی رشد طبیعی گیاهان تحت تنش شوری باشد (۱۲). اندوفیت‌ها با محافظت گیاهان در برابر تنش‌های زیستی و غیر زیستی باعث افزایش رشد و عملکرد گیاهان می‌شوند (۴۴). اندوفیت‌های قارچی علاوه بر اعطای مقاومت در برابر تنش‌های زیستی و غیر زیستی، می‌توانند باعث بهبود جذب عناصر غذایی و رشد گیاه شده و عملکرد میوه را افزایش دهند (۴۷). نقش قارچ اندوفیت *Penicillium sp.* در بهبود رشد و عملکرد گوجه‌فرنگی تحت تنش شوری توسط موری و همکاران (۴۶) گزارش شد. در تحقیقاتی دیگر نشان داده شد که تلقیح قارچ اندوفیت *Penicillium brevicompactum* عملکرد گیاه گوجه‌فرنگی تحت تنش شوری را افزایش داد

گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum L.*) یکی از سبزیجات محبوب و متعلق به خانواده Solanaceae است که به طور گسترده‌ای در سراسر جهان کشت و مصرف می‌شود (تولید جهانی گوجه‌فرنگی تقریباً ۱۸۲ میلیون تن در سال ۲۰۱۷ تخمین زده شده است) (۲۱). گوجه‌فرنگی به دلیل ارزش غذایی بالا، دومین محصول گیاهی مورد علاقه بعد از سیب‌زمینی در جهان محسوب می‌شود (۳۵). همانند سایر محصولات زراعی، برخی تنش‌های زیستی (مانند آفات، عوامل بیماری‌زای گیاهی و علف‌های هرز) و تنش‌های غیر زیستی (مانند شوری، خشکسالی، غرقاب، تنش سرمایی و گرمایی) تولید جهانی گوجه‌فرنگی را تهدید می‌کنند (۳۸). شوری به عنوان یک تنش غیر زیستی می‌تواند باعث ایجاد عدم تعادل اسمزی و یا یونی در سلول‌های گیاه شود. تنش شوری همچنین با ایجاد سمیت و کاهش در دسترس بودن آب، رشد و جوانه‌زنی را محدود کرده و بر تولید محصول تاثیر می‌گذارد (۲۷). تنش شوری بر میزان فعالیت‌های فتوسنتزی در گیاهان تاثیر می‌گذارد (۳). در حقیقت، بین مقدار کلروفیل و رشد گیاه یک همبستگی مثبت وجود دارد و کاهش محتوای کلروفیل نشان دهنده وجود آسیب فتوسنتزی است (۳۹). به طور مشابه، محتویات کاروتنوئید نقش مهمی در ROS و محافظت لیپیدهای غشای پلاسما ناشی از تنش دارد (۱۶) که ممکن است در صورت تحت فشار قرار گرفتن، گیاه تضعیف شود. تنش شوری همچنین باعث از بین رفتن ظرفیت نگهداری آب در بافت‌های گیاهی می‌شود، که بر محتوای آب برگ و رشد و نمو گیاه تاثیر می‌گذارد (۴۸).

از خاکش میلی‌متری استفاده شد و ارتفاع گیاه از سطح خاک تا آخرین برگ ثبت شد. برای اندازه‌گیری وزن خشک ریشه، بعد از قرارگیری این اندام‌ها به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد در داخل آون، وزن آن‌ها توسط ترازو دیجیتال با دقت ۰/۰۱ اندازه‌گیری شد.

غلظت رنگدانه‌ها

برای تعیین غلظت رنگدانه‌ها، نیم گرم از برگ تازه در هاون چینی با پنج میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد ساییده و سپس به مدت ۱۵ دقیقه با سرعت هزار دور در دقیقه سانتریفیوژ شدند. پس از جدا کردن عصاره رویی، مرحله بالا دو بار دیگر تکرار شد. جذب عصاره در طول موج‌های ۶۶۳، ۶۴۵ و ۴۷۰ نانومتر با استفاده از اسپکتروفتومتر (CECIL CE 2501, UK) بر اساس فرمول زیر محاسبه شد (۴۲).

$$A_{663} \times 2/69 - A_{645} \times 12/7 = \text{کلروفیل } a$$

$$A_{663} \times 4/68 - A_{645} \times 22/9 = \text{کلروفیل } b$$

$$\text{کلروفیل کل} = a + \text{کلروفیل } b$$

$$- \text{ (کلروفیل } a \times 1/8) \times (1000 \times A_{770}) = \text{کاروتنوئید} \\ / 198 \text{ (کلروفیل } b \times 0.2/85)$$

محتوای نسبی آب برگ

محتوای نسبی آب برگ (Relative Water Content) با روش کریمی و همکاران (۳۳) و با استفاده از فرمول زیر محاسبه شد:

$$100 \times (FW \times DW) / (TD \times DW) = \text{محتوای نسبی آب برگ}$$

FW: وزن تر برگ، DW: وزن خشک برگ، TW: وزن آماس.

میزان پرولین

پرولین در نمونه‌های برگ برداشت شده با روش باتیس و همکاران (۱۱) اندازه‌گیری شد. مقدار دو میلی‌لیتر از محلول به دست آمده از نیم گرم بافت برگ همراه با ۱۰ میلی‌لیتر اسید سولفوسالیسیلیک ۳ درصد با دو میلی‌لیتر اسیداستیک و دو میلی‌لیتر ناین‌هیدرین ترکیب شده و پس از قرار دادن در بن‌ماری، چهار میلی‌لیتر تولوئن به آن اضافه و میزان جذب در طول موج ۵۲۰ نانومتر قرائت شد.

$$\text{پرولین} = [\text{وزن نمونه (} 0.5 \text{ گرم)} / \text{حجم عصاره (} 10 \text{ میلی‌لیتر)}] \times [1000 / \text{عدد قرائت شده}]$$

میزان قندهای محلول

نیم گرم از بافت تازه برگ با پنج میلی‌لیتر اتانول ۹۶٪ و ۱۰ میلی‌لیتر اتانول ۷۰٪ همگن و سانتریفیوژ شد. سپس ۰/۱ میلی‌لیتر از عصاره الکلی با سه میلی‌لیتر آنترون مخلوط و به مدت ۱۰ دقیقه در بن‌ماری با ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. میزان جذب با اسپکتروفتومتر در طول موج ۶۲۵ نانومتر با استفاده از روش یمم و همکاران (۶۱) قرائت شد.

$$\text{قندهای محلول (میلی‌گرم بر وزن تر)} = [\text{برگ (} 0.5 \text{ گرم)} / \text{عصاره (} 15 \text{ میلی‌لیتر)}] \times [1000 / \text{عدد قرائت شده}]$$

غلظت مالون دی‌آلدئید

مقدار مالون دی‌آلدئید (MDA) از روش هیت و پکر (۲۵) با استفاده از اسپکتروفتومتر در ۵۳۲ نانومتر اندازه‌گیری شد. بر اساس این روش ۰/۲ گرم بافت تازه برگ در پنج میلی‌لیتر تری کلرواستیک یک درصد کوبیده و سانتریفیوژ شد. به یک

(۴۵). در ده‌های گذشته، پیشرفت چشمگیری برای درک چندین مکانیسم تحمل به شوری در قارچ‌های اندوفیت گزارش شده است. سیر تکاملی منجر به فعل و انفعالات پیچیده بین اندوفیت‌ها و گیاهان شده است. بسیاری از آن‌ها به توسعه یک رابطه همزیستی بین اندوفیت و گیاهان کمک می‌کنند (۲۶ و ۳۶). هدف از پژوهش حاضر، بررسی کاربرد اندوفیت قارچی *Penicillium chrysogenum* جداسازی شده از گیاهان شورپسند *Suaeda vermiculata* و ارزیابی آن‌ها در افزایش تحمل به تنش شوری در گیاه گوجه‌فرنگی است.

مواد و روش‌ها

مواد گیاهی و اعمال تنش

این آزمایش به صورت گلخانه‌ای و در پاییز سال ۱۳۹۸ انجام شد. برای انجام آزمایش از بذور گوجه‌فرنگی رقم (۸۳۲۰) استفاده شد. آزمایش به صورت فاکتوریل (فاکتور اول تنش شوری در چهار سطح ۰، ۴، ۶ و ۸ دسی‌زیمنس بر متر و فاکتور دوم اندوفیت قارچی در دو سطح تلقیح و بدون تلقیح) در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. به منظور تلقیح بذر گوجه‌فرنگی توسط اسپور قارچ *P. chrysogenum* ابتدا قارچ مذکور روی محیط کشت PDA (Potato Dextrose Agar) به مدت چهار هفته در انکوباتور با دمای 28 ± 1 درجه سانتی‌گراد کشت و نگهداری شد. اسپورهای قارچ مورد نظر با ۱۰ میلی‌لیتر محلول آب-توتین ۲۰ درصد در پتری دیش‌ها جمع‌آوری شدند. با استفاده از لام نوبار اسپورهای موجود در هر پتری دیش شمارش و با غلظت حدود $10^6 \times$ میلی‌لیتر $(CFU \text{ ml}^{-1})$ آماده استفاده شدند (۲۰).

برای شروع آزمایش، ابتدا بذور گوجه‌فرنگی (رقم ۸۳۲۰) با استفاده از اتانول (۷۰ درصد) به مدت ۳۰ ثانیه استریل و سپس با استفاده از هیپوکلریت سدیم ۰/۵ درصد به مدت ۹۰ ثانیه استریل و پس از آن به طور کامل سه بار با آب مقطر دوبار تقطیر شست و شو شدند (۵۵). برای تماس بهتر بذور با اندوفیت‌ها، از ماده کربوکسی متیل سلولاز یک درصد استفاده شد. سپس بذور انکوبه شده با تیمارهای اندوفیت به مدت شش ساعت روی شیکر قرار داده شدند. شاهد بذور (بدون تلقیح) در آب مقطر حاوی توتین ۲۰ درصد بود. قبل از کشت بذور تیمار شده، خاک مورد استفاده (پیتماس و پرلایت) در دمای ۱۲۱ درجه سانتی‌گراد اتوکلاو شد. طی دوره کشت از آب اتوکلاو شده برای آبیاری بذور یک روز درمیان استفاده شد (۵۵). بعد از رشد اولیه بذور، گیاهچه‌ها به گلدان‌های (دارای خاک اتوکلاو شده با دمای ۱۲۱ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱/۲ اتمسفر) در گلخانه دانشگاه هرمزگان با شرایط دمای (۲۰-۲۵ درجه سانتی‌گراد) و رطوبت (۶۵-۷۰ درصد) منتقل شدند و بعد از استقرار مناسب، تلقیح اندوفیت قارچی مجدداً به صورت محلول‌پاشی روی شاخ و برگ گیاهچه‌ها انجام شد (۵۷). تیمار شاهد بدون محلول‌پاشی بود. اندوفیت قارچی در دو سطح تلقیح و عدم تلقیح و تیمار شوری (آب چاه) در چهار سطح (۰، ۴، ۶ و ۸ دسی‌زیمنس بر متر) در گیاهان مورد مطالعه اعمال شدند. برای اندازه‌گیری ارتفاع گیاه

ارتفاع گیاه و وزن خشک ریشه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که برهمکنش اثر سطوح شوری و تلقیح اندوفیت قارچی بر ارتفاع گیاه و وزن خشک ریشه به ترتیب در سطح احتمال پنج و یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). با افزایش تنش شدید، ارتفاع گیاه و وزن خشک ریشه کاهش ولی تلقیح اندوفیت قارچی باعث افزایش ارتفاع و وزن خشک ریشه گیاه شد. نتایج نشان داد که حضور اندوفیت در برابر عدم حضور آن در تنش شوری (۸ دسی‌زیمنس بر متر) به ترتیب باعث بهبود در صفات ارتفاع به میزان (۱۲۲/۱۷٪) و وزن خشک به میزان (۵۰/۶۸٪) شد (شکل ۱ الف و ب). بیومس معمولاً به عنوان شاخص توانایی گیاه در تحمل شوری ارزیابی می‌شود. تلقیح اندوفیت‌های قارچی به گیاهان گوجه‌فرنگی تحت تنش شوری باعث افزایش محتوای کلروفیل و کاروتنوئید برای جبران کاهش بیومس ناشی از شوری می‌شود. در چندین مطالعه مشخص شده است که تلقیح قارچ اندوفیت باعث افزایش بیومس در گیاهان ذرت (*Vochysia divergens* Pohl، سویا (۳۲)، (۵۱)، خردل چینی (۴)، برنج (۵۴) و گندم (۶۳) شده است. در مطالعاتی نقش قارچ اندوفیت *Piriformospora indica* در افزایش رشد ریشه در گیاه آراییدوپسیس نشان داده شد (۵۸). تا زمانی که بهره‌برداری از مناطق تحت تاثیر نمک دشوار باشد، سیستم ریشه‌ای بهبود یافته با قارچ اندوفیت، امکان استفاده از آب و مواد معدنی مورد نیاز گیاهان را در مناطق غیر شور فراهم می‌کند (۳۰).

میلی‌لیتر از محلول رویی چهار میلی‌لیتر تری کلرواستیک ۲۰ درصد که حاوی ۰/۵ درصد تیوباریوتیک اسید است، اضافه شد. مخلوط در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد و بعد از قرارگیری روی یخ، غلظت مالون دی‌آلدئید آن اندازه‌گیری شد.

مالون دی‌آلدئید

غلظت کمپلکس بر حسب میلی‌مولار = A = جذب، = E = ضریب خاموش معادل $155 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ = B = عرض کووت، C

پراکسید هیدروژن

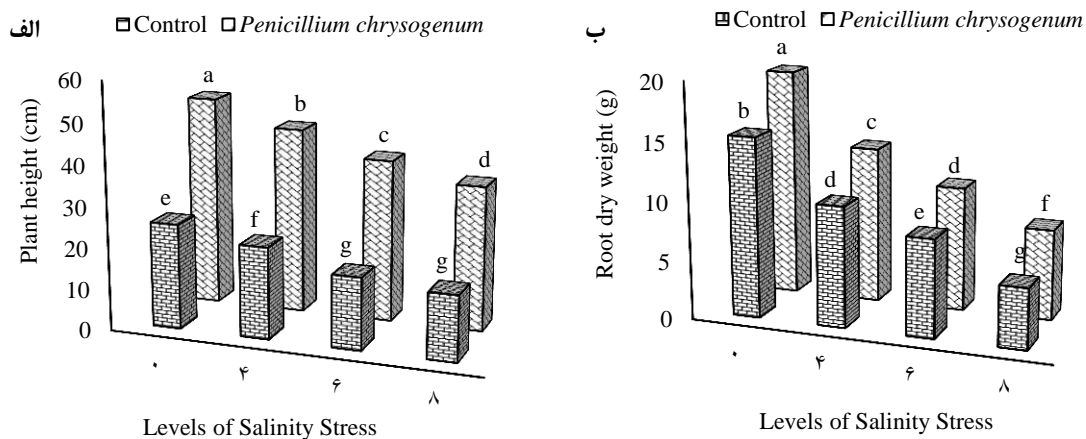
۰/۱ گرم نمونه برگ با پنج میلی‌لیتر تری کلرواستیک اسید ۰/۱ درصد ساییده و مخلوط سانتریفیوژ شد. پس از آن ۵۰۰ میکرولیتر از عصاره به همراه ۵۰۰ میکرولیتر بافر فسفات و دو میلی‌لیتر معرف یک مولار یدید پتاسیم به مدت یک ساعت در تاریکی قرار داده شد. میزان پراکسید هیدروژن نمونه‌ها با دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۳۹۰ نانومتر قرائت شد. غلظت پراکسید هیدروژن نمونه‌ها بر حسب میلی‌گرم بر گرم وزن تر محاسبه شد (۶۰).

پراکسید هیدروژن = [وزن تر نمونه (۰/۱ گرم) / حجم عصاره (۱۵ میلی‌لیتر)] × [۱۰۰۰ / عدد قرائت شده]

آنالیز آماری

در این آزمایش، داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف نرمال شد. آنالیز داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS نسخه ۹/۴ و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد انجام و نمودارها در رسم شد.

نتایج و بحث



شکل ۱- مقایسه میانگین ارتفاع گیاه (الف) و وزن خشک ریشه (ب) گوجه‌فرنگی در دو سطح عدم تلقیح (کنترل) و تلقیح قارچ اندوفیت *Penicillium chrysogenum* در سطوح مختلف تنش شوری (۰، ۴، ۶ و ۸ دسی‌زیمنس بر متر) در شرایط گلخانه (میانگین‌های دارای حروف مشابه اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد ندارند)

Figure 1. Comparison of mean plant height (a) and root dry weight (b) of tomatoes inoculated with Endophytic fungus *Penicillium chrysogenum* at different levels of salinity stress (0, 4, 6 and 8 ds/m²) under greenhouse conditions (Means with similar letters do not differ significantly at the P≤0.05 probability level)

جدول ۱- تجزیه واریانس گوجه‌فرنگی تلقیح شده با قارچ اندوفیت *Penicillium chrysogenum* در سطوح مختلف تنش شوری
 Table 1. Analysis of variance of tomatoes inoculated with endophytic fungus *Penicillium chrysogenum* at different levels of salinity stress

منابع تغییرات Sources of changes	درجه آزادی Degrees of freedom	ارتفاع گیاه Plant height	وزن خشک ریشه Root dry weight	محتوای رطوبت نسبی Relative water content	کلروفیل <i>a</i> Chlorophyll <i>a</i>	کلروفیل <i>b</i> Chlorophyll <i>b</i>
شوری	۳	۱۹۷/۷۰**	۱۲۹/۱۱**	۲۵۰۴/۴۶**	۱۶/۷۳**	۱۴/۹۲**
اندوفیت	۱	۳۰۵۰/۷۸**	۵۴/۰۶**	۸۲۲/۸۰**	۷/۸۴**	۱/۶۸**
اندوفیت × شوری	۳	۱۰/۶۵*	۰/۹۴**	۲۴/۹۵**	۰/۱۳**	۰/۰۰۷*
خطا	۱۶	۲/۵۱	۰/۰۹۲	۰/۹۵	۰/۰۰۸	۰/۰۱۰
ضریب تغییرات (درصد)	-	۵/۰۲	۲/۷۰	۱/۵۹	۱/۸۷	۲/۹۳

* و **: به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

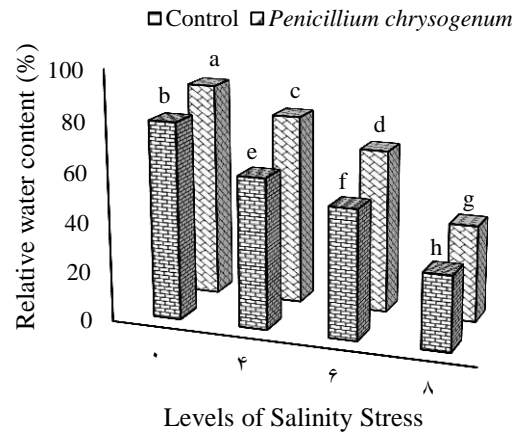
درصد محتوای رطوبت نسبی

یافته‌های حاصل از نتایج تجزیه واریانس (جدول ۱) نشان داد که برهمکنش اثر سطوح شوری و تلقیح اندوفیت قارچی بر محتوای رطوبت نسبی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. با افزایش تنش شوری میزان محتوای رطوبت نسبی کاهش یافت، به طوری که بیشترین میزان در تیمارهای تلقیح شده با اندوفیت قارچی و کمترین در تنش شدید و عدم تلقیح مشاهده شد. حضور اندوفیت در تنش شوری (۸ دسی‌زیمنس بر متر) منجر به افزایش (۲۹/۹۲٪) محتوای رطوبت نسبی نسبت به عدم حضور اندوفیت شد (شکل ۲). در این تحقیق رابطه میان گیاه و قارچ احتمالا باعث بهبود جذب آب و افزایش پتانسیل آب برگ و بنابراین تبادل گازی در گیاهان تحت تنش شوری شد. اندازه‌گیری محتوای نسبی آب (RWC) در سلول‌های گیاهی برای بیان وضعیت آب در گیاهان بوده و تعادل بین میزان عرضه آب نسبی برگ و میزان تعرق را نشان می‌دهد (۵۶). یافته‌های پژوهش حاضر نشان داد که گیاهان تلقیح شده با قارچ اندوفیت دارای محتوای آب بیشتری هستند، که با یافته‌های ژانگ و همکاران (۶۴) هم راستا بود. محتوای نسبی آب برگ در گیاهان یکی از بهترین معیارها برای اندازه‌گیری وضعیت آب در گیاهان است، زیرا در بسیاری از فعالیت‌های متابولیکی در بافت‌ها نقش دارد (۲۹). گیاهان گوجه‌فرنگی تلقیح شده با قارچ *Piriformospora indica* افزایش قابل توجهی در مقدار رطوبت نسبی در مقایسه با گیاهان شاهد از خود نشان دادند (۲۴).

رنگدانه‌های گیاهی

نتایج تجزیه واریانس به دست آمده نشان داد که برهمکنش اثر سطوح شوری و تلقیح اندوفیت قارچی بر کلروفیل *a* در سطح احتمال یک درصد و کلروفیل *b* در سطح احتمال پنج درصد (جدول ۱) و کلروفیل کل در سطح احتمال

پنج درصد و کاروتنوئید در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). با افزایش تنش شوری میزان رنگیزه‌ها کاهش یافته، اما تلقیح اندوفیت قارچی موجب افزایش این پارامترها شد. حضور اندوفیت در برابر عدم حضور آن در تنش شوری (۸ دسی‌زیمنس بر متر) به ترتیب باعث بهبود در صفات کلروفیل *a* (۲۸/۶۲٪)، کلروفیل *b* (۳۶/۲۴٪)، کلروفیل کل (۳۱/۰۲٪) و کاروتنوئید (۱۴/۸۴٪) نسبت به عدم حضور اندوفیت شد (جدول ۳). بنابراین، اثر اندوفیت‌ها بر افزایش غلظت کاروتنوئید را می‌توان یکی از مکانیسم‌های مقاومت مثبت دانست که توسط قارچ‌های اندوفیت در افزایش تحمل گیاهان به شوری ایجاد می‌شود. کاروتنوئیدها از بافت‌های فتوسنتزی محافظت می‌کنند. حفظ ساختار کاروتنوئیدها در شرایط تنش به توانایی سیستم دفاع آنتی‌اکسیدان غیر آنزیمی گیاه در حذف گونه‌های اکسیژن فعال مرتبط است (۹). شوری باعث کاهش محتوای کلروفیل می‌شود (۵۳). تنش شوری با سرکوب آنزیم‌های خاصی که مسوول سنتز رنگیزه‌های فتوسنتزی هستند باعث کاهش رنگدانه‌ها می‌شوند (۱۴). کاروتنوئیدها در حال تثبیت و محافظت از فاز لیپیدی غشای تیلاکوئید هستند و به عنوان سرکوب کننده‌های اکسیژن و رادیکال‌های اکسیژن فعال رفتار می‌کنند (۱۳) که محتوای بالاتر در گوجه‌فرنگی تیمار شده با اندوفیت گیاهان را در برابر تنش‌های زنده و غیرزنده محافظت می‌کند. برخی مطالعات نقش مثبت اندوفیت روی فتوسنتز در گیاهان تحت تنش شوری را نشان داده‌اند (۸). در گیاه *Coleus forskohlii*، اثر متقابل قارچ *P. indica* با ریشه گیاهان باعث افزایش محتوای کلروفیل *a*، کلروفیل *b* و کلروفیل کل شد (۱۸). در تحقیقی روی گوجه‌فرنگی، صفات مورفولوژیکی و رنگدانه‌های فتوسنتزی گیاه تلقیح شده با قارچ اندوفیت *Piriformospora indica* بهبود یافت (۲۴).



شکل ۲- مقایسه میانگین محتوای رطوبت نسبی گوجه‌فرنگی در دو سطح عدم تلقیح (کنترل) و تلقیح قارچ اندوفیت *Penicillium chrysogenum* در سطوح مختلف تنش شوری (۰، ۴، ۶ و ۸ دسی‌زیمنس بر متر) در شرایط گلخانه (میانگین‌های دارای حروف مشابه اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد ندارند)

Figure 2. Comparison of mean relative moisture content of tomato inoculated with endophytic fungus *Penicillium chrysogenum* at different levels of salinity stress treatments (0, 4, 6 and 8 ds/m²) under greenhouse conditions (Means with similar letters do not differ significantly at the P≤0.05 probability level)

جدول ۲- تجزیه واریانس گوجه‌فرنگی تلقیح شده با قارچ اندوفیت *Penicillium chrysogenum* در سطوح مختلف تنش شوری
Table 2. Analysis of variance of tomatoes inoculated with endophytic fungus *Penicillium chrysogenum* at different levels of salinity stress

پراکسید هیدروژن Peroxide	مالون دی‌آلدئید Malonaldehyde	قندهای محلول Soluble sugars	پرولین Proline	کاروتنوئید Carotenoids	کلروفیل کل Total Chlorophyll	درجه آزادی Degrees of freedom	منابع تغییرات Sources of changes
۲۶۸۱/۳۷**	۷/۴۲**	۴/۹۷**	-/۰۰۰۷**	۳/۲۱**	۶۱/۹۸**	۳	شوری
۴۹۳/۴۰**	۲/۰۹**	۴/۶۳**	-/۰۰۰۹**	۱/۶۵**	۱۶۷۸**	۱	اندوفیت
۲/۰۲*	-/۰۲**	-/۱۰*	-/۰۰۰۰۴*	-/۰۷۷**	-/۱۱*	۳	اندوفیت × شوری
۱/۸۰	-/۰۰۱۸	-/۰۱۰	-/۰۰۰۰۱	-/۰۰۱	-/۰۲۳	۱۶	خطا
۱/۷۹	۱/۴۳	۳/۸۰	۹/۹۸	۰/۸۱	۱/۸۳	-	ضریب تغییرات (درصد)

* و **: به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف تیمارهای شوری و اندوفیت قارچی *Penicillium chrysogenum* بر کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و کاروتنوئید گیاه گوجه‌فرنگی

Table 3. Comparison of the mean effect of different levels of salinity and fungal endophytic treatments of *Penicillium chrysogenum* on chlorophyll a, chlorophyll b, total chlorophyll and carotenoids of tomato

کاروتنوئید Carotenoids	کلروفیل کل Total Chlorophyll	کلروفیل b Chlorophyll b	کلروفیل a Chlorophyll a	تیمار Treatment	ترکیب composition
(میلی‌گرم بر گرم وزن تر) (mg/g FW)				سطوح شوری Salinity levels	اندوفیت قارچی Fungal endophyte
۴/۰±۶۳/۰۱۰ ^b	۱۱/۰±۳۳/۰۴۹ ^b	۴/۰±۹۱/۰۲ ^b	۶/۰±۵۲/۰۳۷ ^b	-	عدم تلقیح
۳/۰±۸۲/۰۰۸ ^c	۸/۰±۶۱/۰۴۴ ^d	۴/۰±۱۲/۰۳۶ ^d	۴/۰±۴۸/۰۰۹ ^c	۴	(Noting inoculated)
۳/۰±۲۶/۰۲۸ ^f	۵/۰±۹۵/۰۷۰ ^f	۲/۰±۳۸/۰۱۹ ^f	۲/۰±۵۷/۰۸۱ ^f	۶	
۲/۰±۸۳/۰۱۷ ^h	۴/۰±۱۹/۱۱ ^h	۱/۰±۴۹/۰۸۲ ^h	۲/۰±۶۹/۰۳۰ ^g	۸	
۴/۰±۹۱/۰۰۹ ^a	۱۳/۰±۱۳/۰۸۹ ^a	۵/۰±۵۳/۰۵۳ ^a	۷/۰±۵۹/۰۴۷ ^a	-	تلقیح
۴/۰±۴۲/۰۰۷ ^c	۱۰/۰±۳۳/۱۰ ^c	۴/۰±۵۸/۰۶۱ ^c	۵/۰±۷۵/۰۳۹ ^c	۴	(Inoculated)
۴/۰±۱۷/۰۱۳ ^d	۷/۰±۹۲/۴۵ ^e	۲/۰±۸۸/۰۴۲ ^e	۵/۰±۰۴/۰۲ ^d	۶	
۳/۰±۲۵/۰۰۶ ^g	۵/۰±۴۹/۰۰۵ ^g	۲/۰±۰۳/۰۳۵ ^g	۳/۰±۴۶/۰۲۸ ^f	۸	

میانگین‌های دارای حروف مشابه اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

باعث تجمع پرولین آزاد و کربوهیدرات محلول شد. علاوه بر این، تلقیح اندوفیت قارچی به طور قابل توجهی پرولین نسبت به گیاهان تیمار نشده به اندوفیت تحت تنش شوری را افزایش داد. توانایی جذب آب از خاک توسط گیاهان با قرار گرفتن در معرض تنش شوری، کاهش یافت که در نتیجه آن روابط آب-سلول مختل شده و توسعه سلول متوقف می‌شود. به منظور کاهش این اثرات منفی، گیاهان از تنظیم اسمزی به عنوان یک مکانیسم تحمل به شوری استفاده می‌کنند (۶۰). تجمع اسمولیت‌ها به صورت پرولین، گلیسین بتائین، قندها،

پرولین

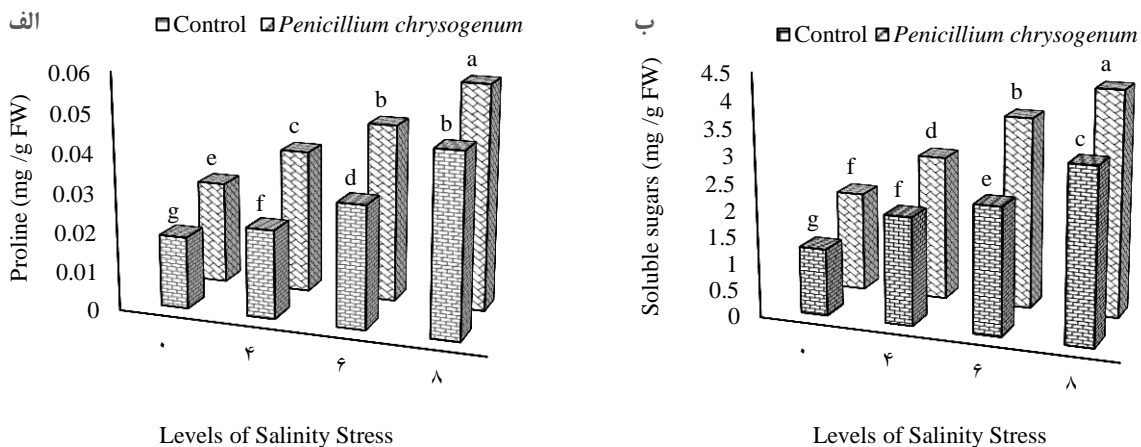
یافته‌های حاصل از نتایج تجزیه واریانس نشان داد که بر همکنش اثر سطوح شوری و تلقیح اندوفیت قارچی بر میزان پرولین در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). نتایج این تحقیق نشان داد که تلقیح اندوفیت قارچی در تنش شوری (۸ دسی‌زیمنس بر متر) موجب افزایش پرولین می‌شود. حضور اندوفیت در تنش شوری (۸ دسی‌زیمنس بر متر) منجر به افزایش (۲۶/۶۶٪) در صفت پرولین در برابر عدم حضور آن شد (شکل ۳ الف). در مطالعه حاضر، سطوح مختلف شوری

اسیدهای آلی، پلی آمین ها و آمینواسیدها به تنظیم اسمزی کمک می کند. این اسمولیت ها غالباً به عنوان املاح سازگار خوانده می شوند، که ترکیبات آلی با وزن مولکولی کم، با غلظت های بالای محلول در آب و غیر سمی هستند (۱۶). پرولین یکی از متداول ترین محافظ های اسمولیتی است که در هنگام تنش شوری در گیاهان تجمع می یابد و در نتیجه اثرات منفی شوری را بهبود می بخشد (۳۴). در تحقیقات خان و همکاران (۳۵) نشان داده شد که افزایش سطح پرولین در گیاهان تحت تنش شوری ممکن است به دلیل فعال شدن بیوسنتز پرولین باشد که گردش پروتئین را افزایش می دهد. محققین مختلف تجمع پرولین در گیاهان تلقیح شده با اندوفیت های مختلف قارچی تحت تنش شوری مانند ذرت (*Zea mays*) تلقیح شده با قارچ *Yarrowia* (۲۸)، جو (*Hordeum vulgare*) تلقیح شده با قارچ *Epichloe bromicola* (۱۵)، گوجه فرنگی (*S. lycopersicum*) تلقیح شده با قارچ *P. indica* (۲)، خردل چینی (*Brassica juncea*) تلقیح شده با قارچ *Trichoderma harzianum* (۴) را گزارش کرده اند.

قندهای محلول

یافته های حاصل از نتایج تجزیه واریانس نشان داد که برهمکنش اثر سطوح شوری و تلقیح اندوفیت قارچی بر قندهای محلول در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود (جدول ۲). نتایج نشان داد که افزایش تنش شوری منجر به کاهش قندهای محلول اما تلقیح اندوفیت قارچی سبب افزایش قندهای محلول شد. حضور اندوفیت در برابر عدم حضور آن در تنش شوری (۸ دسی زیمنس بر متر) به میزان

باعث بهبود در صفت قندهای محلول شد (شکل ۳ ب). در گیاهان متحمل به شوری، تجمع کل قندهای محلول مانند گلوکز، ساکارز، دکسترین ها و مالتوز به عنوان یک محافظت کننده عمل می کنند، زیرا آن ها می توانند غشای سلول و پروتوپلاست را تثبیت کنند. این قندها همچنین از آنزیم های محلول در آب در برابر غلظت های بالای درون سلولی یون های غیر آلی محافظت می کنند (۴۱). مولکول های اسمزی از جمله قندهای محلول و پروتئین ها، شاخص های مهمی در پاسخ به تنش های غیر زیستی هستند (۱۹). افزایش تجمع گلوکز و ساکارز در گیاهان معمولاً نشان دهنده فعال شدن مکانیسم محافظتی در برابر آسیب اکسیداتیو ناشی از شوری زیاد در محیط گیاه است (۱۰). یکی از آنزیم های اصلی تجزیه کننده نشاسته، گلوکان و اتراز است که توسط اندوفیت در ریشه های کلونیزه فعال شده و مسئول افزایش کربوهیدرات های محلول در گیاهان تلقیح شده به اندوفیت تحت تنش شوری است. نقش موثر قارچ های اندوفیت در افزایش تجمع قندهای محلول در گیاهان تحت تنش شوری گزارش شده است (۶۳). یانگ و همکاران (۵۹) نشان دادند که تلقیح قارچ *Phomopsis liquidambari* باعث ترشح و رسوب قند در ریزوسول های برنج و قارچ *Phomopsis liquidambari* با تامین کربن بقایای ریشه برنج را تحریک به رشد کرد. علاوه بر این، در تحقیقی قارچ های اندوفیت با افزایش قند محلول در سیب (*Malus domestica*) رقم (Honeycrisp) کیفیت میوه را افزایش دادند (۵۲).



شکل ۳- مقایسه میانگین میزان پرولین (الف) و قندهای محلول (ب) گوجه فرنگی در دو سطح عدم تلقیح (کنترل) و تلقیح قارچ اندوفیت *Penicillium chrysogenum* در سطوح مختلف تنش شوری (۰، ۴، ۶ و ۸ دسی زیمنس بر متر) در شرایط گلخانه (میانگین های دارای حروف مشابه اختلاف معنی داری در سطح احتمال پنج درصد ندارند)

Figure 3. Comparison of mean proline content in tomato plants inoculated with endophytic fungus *Penicillium chrysogenum* at different levels of salinity stress treatments (0, 4, 6 and 8 ds/m⁻¹) under greenhouse conditions (Means with similar letters do not differ significantly at the P<0.05 probability level)

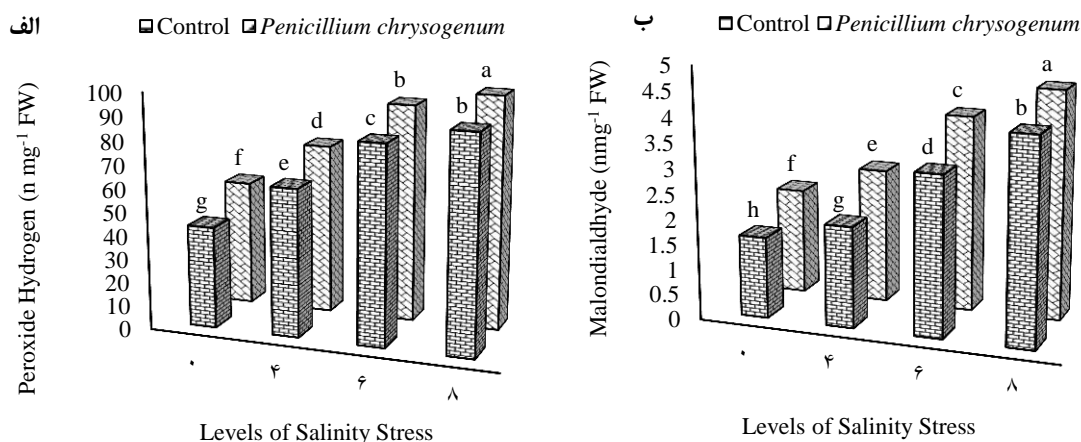
افزایش داد (۶۲) که با نتایج مطالعات موجود مطابقت داشت. گزارش‌ها نشان می‌دهد که تولید مالون دی‌آلدئید با تلقیح قارچ اندوفیت در گیاهان *Ephedra aphylla* (۵)، *Vicia faba* (۳) و *Sesbania sesban* (۱) افزایش یافته است. نتایج مشابهی با تلقیح اندوفیت در گیاه *Elymus dahuricus* و *Oryza sativa* گزارش شده است (۶۵) که با نتایج حاضر همسو می‌باشد.

پراکسید هیدروژن

همان‌طور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود برهمکنش اثر سطوح شوری و تلقیح اندوفیت قارچی بر پراکسید هیدروژن در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود. نتایج نشان داد که افزایش تنش شوری شدید منجر به کاهش پراکسید هیدروژن شده و حضور اندوفیت در تنش شوری (۸ دسی‌زیمنس بر متر) در برابر عدم حضور به میزان (۴۷٪) باعث بهبود در صفت پراکسید هیدروژن شد (شکل ۶). در مطالعه ما شوری باعث افزایش قابل توجه H_2O_2 به عنوان یک نشانه واضح از تنش اکسیداتیو بود. از طرفی دیگر تلقیح با قارچ اندوفیت، از تجمع H_2O_2 در گیاهان تحت تنش شوری به دلیل تنظیم بیش از حد آنزیم‌های مهارکننده H_2O_2 جلوگیری کرد. افزایش پراکسید هیدروژن در پژوهش حاضر مطابق با یافته‌های لیو و همکاران (۴۳) بود. این نتیجه گزارش‌های قبلی را تایید می‌کند (۳۱ و ۴۹).

مالون دی‌آلدئید

نتایج تجزیه واریانس به دست آمده نشان داد که برهمکنش اثر سطوح شوری و تلقیح اندوفیت قارچی بر میزان مالون دی‌آلدئید در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). نتایج نشان داد که افزایش تنش شوری شدید منجر به کاهش مالون دی‌آلدئید شده و حضور اندوفیت در تنش شوری (۸ دسی‌زیمنس بر متر) منجر به افزایش (۲۱/۷۲٪) در صفت مالون دی‌آلدئید در برابر عدم حضور آن شد (شکل ۵). تلقیح با اندوفیت قارچی از پراکسیداسیون لیپید در هر سطح تنش جلوگیری می‌کند که می‌تواند به دلیل جلوگیری از آسیب غشا و القا پاسخ‌های آنتی‌اکسیداتیو توسط اندوفیت‌ها باشد، که گیاه از آسیب اکسیداتیو محافظت می‌کند. نتایج حاصل از مطالعه ما نشان داد که محتوای مالون دی‌آلدئید به طور قابل توجهی در گیاه گوجه‌فرنگی تحت تنش شوری در مقایسه با شاهد افزایش یافت، که با یافته‌های خداوردیو و کشتیانی؛ راوات و همکاران (۳۷ و ۵۰) سازگار بود. مالون دی‌آلدئید نشان دهنده صدمات و آسیب‌های غشایی در سطح سلولی در گیاهان تحت تنش شدید است (۶۴). در یک تحقیق روی انواع برنج و ذرت حساس به نمک، مشخص شد که این گیاهان محتوای مالون دی‌آلدئید بیشتری در پاسخ به تنش شوری داشتند (۱۹). در مطالعه‌ای دیگر مشخص شد که تلقیح گیاه *Bermudagrass* با قارچ اندوفیت *Aspergillus aculeatus* تجمع مالون دی‌آلدئید ناشی از تنش شوری را



شکل ۵- مقایسه میانگین غلظت مالون دی‌آلدئید (الف) و محتوای پراکسید هیدروژن (ب) گوجه‌فرنگی در دو سطح عدم تلقیح (کنترل) و تلقیح قارچ اندوفیت *Penicillium chrysogenum* در سطوح مختلف تنش شوری (۰، ۴، ۶ و ۸ دسی‌زیمنس بر متر) در شرایط گلخانه (میانگین‌های دارای حروف مشابه اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد ندارند)

Figure 5. Comparison of mean concentration of Malondialdehyde of tomato inoculated with endophytic fungus *Penicillium chrysogenum* at different levels of salinity stress treatments (0, 4, 6 and 8 ds/m²) under greenhouse conditions (Means with similar letters do not differ significantly at the P≤0.05 probability)

قارچی نشان داده‌اند که دارای پتانسیل قابل قبولی در کاهش تبعات ناشی از شوری روی دامنه وسیعی از گیاهان میزبان هستند. نتایج به دست آمده از این پژوهش نیز اثر مثبت سوبه اندوفیت قارچی *P. chrysogenum* روی رشد گیاه گوجه‌فرنگی تحت تنش شوری را تایید کرد. کاربرد قارچ اندوفیت به طور کلی در این پژوهش باعث کاهش اثرات منفی شوری و افزایش میزان صفات ارتفاع گیاه، وزن خشک، درصد

نتیجه‌گیری کلی

برای تامین تقاضای فعلی و آینده غذا برای جمعیتی که به سرعت در حال رشد است، سیستم‌های جدید و پایدار کشاورزی در استفاده موثر از منابع آب و زمین مورد نیاز است. این امر به ویژه در رابطه با چالش‌های فعلی تغییرات آب و هوا، جایی که تنش غیرزنده عامل محدود کننده‌ای برای تولید محصولات زراعی است، بسیار مهم می‌باشد. اندوفیت‌های

مجدد یافته‌های حاضر، می‌توان امیدوار بود که در آینده بتوان از این ارگانیسم‌ها در قالب کودهای زیستی برای کمتر کردن اثرات شوری در محصولات کشاورزی مختلف استفاده کرد.

محتوای نسبی، رنگدانه‌های گیاهی، پرولین، قندهای محلول، مالون دی‌آلدئید و پراکسید هیدروژن در گوجه‌فرنگی شد. با توجه به یافته‌های حاضر و با انجام پژوهش‌های بیشتر و تایید

منابع

1. Abd-Allah, E.F., A. Hashem, A.A. Alqarawi and A. Alwathnani Hend. 2015. Alleviation of adverse impact of cadmium stress in sunflower (*Helianthus annuus* L.) by arbuscular mycorrhizal fungi. Pakistan Journal. Botany, 47: 785-795.
2. Abdelaziz, M., E. Abdelsattar, M. Emad A. Abdeldaym, A.M. Atia, M. Abdel Wahab, M.M.Maged, M. Saad and H Heribert. 2019. "Piriformospora indica alters Na⁺/K⁺ homeostasis, antioxidant enzymes and LeNHX1 expression of greenhouse tomato grown under salt stress." Journal Scientia Horticulturae 256: 108-532.
3. Abeer, H., E.F. Abd-Allah, A.A. Alqarawi, G. El-Didamony, M. Alwhibi, D. Egamberdieva, and P. Ahmad. 2014. Alleviation of adverse impact of salinity on faba bean (*Vicia faba* L.) by arbuscular mycorrhizal fungi. Pakistan Journal. Botany, 46: 2003-2013.
4. Ahmad, P., A. Hashem, E.F. Abd-Allah, A.A. Alqarawi, R. John, D. Egamberdieva and S. Gucl. 2015. Role of *Trichoderma harzianum* in mitigating NaCl stress in Indian mustard (*Brassica juncea* L.) through antioxidative defense system. Journal Frontiers in plant science, 6: 868.
5. Alqarawi, A.A., E.F. Abd Allah and A. Hashem. 2014. Alleviation of salt-induced adverse impact via mycorrhizal fungi in *Ephedra aphylla* Forssk. Journal of Plant Interactions, 9: 802-810.
6. Aasegawa, P.M., R.A. Bressan, J.K. Zhu and H.J. Bohnert. 2000. Plant cellular and molecular responses to high salinity. Journal Annual review of plant biology, 51: 463-499.
7. Ashraf, M. and Q. Ali. 2008. Relative membrane permeability and activities of some antioxidant enzymes as the key determinants of salt tolerance in canola (*Brassica napus* L.). Journal of Environmental and experimental Botany, 63: 266-273.
8. Azad, K. and S. Kaminskyj. 2016. A fungal endophyte strategy for mitigating the effect of salt and drought stress on plant growth. Symbiosis, 68: 73-78.
9. Bandyopadhyay, U., D. Das and R.K. Banerjee. 1999. Reactive oxygen species: oxidative damage and pathogenesis. Journal of Current science, pp: 658-666.
10. Bartels, D. and R. Sunkar. 2005. Drought and salt tolerance in plants. Crit. Rev. Journal Plant science . 24: 23-58.
11. Bates, L.S., R.P. Waldren and I.D. Teare. 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. Journal Plant and soil, 39: 205-207.
12. Bilal, L., S. Asaf, M. Hamayun, H. Gul, A. Iqbal, I. Ullah, I.J. Lee and A. Hussain. 2018. Plant growth promoting endophytic fungi *Asprgillus fumigatus* TS1 and *Fusarium proliferatum* BRL1 produce gibberellins and regulates plant endogenous hormones. Symbiosis, 76: 117-127.
13. Bu, N., X. Li, Y. Li, C. Ma, L. Ma and C. Zhang. 2012. Effects of Na₂CO₃ stress on photosynthesis and antioxidative enzymes in endophyte infected and non-infected rice. Ecotoxicology and environmental safety, 78: 35-40.
14. Chaves, M.M., J. Flexas and C. Pinheiro. 2009. Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. Journal Annals of botany, 103: 551-560.
15. Chen, T., C. Li, J.F. White and Z. Nan. 2019. Effect of the fungal endophyte *Epichloë bromicola* on polyamines in wild barley (*Hordeum brevisubulatum*) under salt stress. Journal Plant and Soil, 436: 29-48.
16. Chen, T.H. and N. Murata. 2011. Glycinebetaine protects plants against abiotic stress: mechanisms and biotechnological applications. Journal Plant, cell and environment, 34: 1-20.
17. Das, A., S. Kamal, N.A. Shakil, I. Sherameti, R. Oelmüller, M. Dua, N. Tuteja, A.K. Johri and A. Varma. 2012. The root endophyte fungus *Piriformospora indica* leads to early flowering, higher biomass and altered secondary metabolites of the medicinal plant, *Coleus forskohlii*. Journal Plant signaling and behavior, 7: 103-112.
18. Das, K. and A. Roychoudhury. 2014. Reactive oxygen species (ROS) and response of antioxidants as ROS-scavengers during environmental stress in plants. Journal Frontiers in Environmental Science, 2: 53.
19. De Azevedo Neto, A.D., J.T. Prisco, J. Enéas-Filho, C.E.B. de Abreu and E. Gomes-Filho. 2006. Effect of salt stress on antioxidative enzymes and lipid peroxidation in leaves and roots of salt-tolerant and salt-sensitive maize genotypes. Journal Environmental and Experimental Botany, 56: 87-94.
20. Deshmukh, S. R., P. Hüchelhoven, J. Schäfer, M. Imani, M. Sharma, F. Weiss and K.H. Kogel. 2006. The root endophytic fungus *Piriformospora indica* requires host cell death for proliferation during mutualistic symbiosis with barley. Proceedings of the National Academy of Sciences, 103: 18450-18457.
21. FAOSTAT. 2020. Crops: tomatoes. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>, extracted on 9 August, 2019.

22. Farias, G.C., K.G. Nunes, M.A. Soares, K.A. de Siqueira, W.C. Lima, A.L.R. Neves, C.F. de Lacerda and E. Gomes Filho. 2020. Dark septate endophytic fungi mitigate the effects of salt stress on cowpea plants. *Brazilian Journal of Microbiology*, 51: 243-253.
23. Gharsallah, C., H. Fakhfakh, D. Grubb and F. Gorsane. 2016. Effect of salt stress on ion concentration, proline content, antioxidant enzyme activities and gene expression in tomato cultivars. *Journal AoB Plants*.
24. Ghorbani, A., H. Pirdashti and M. Ramezani. 2016. Effect of endophyte fungal symbiosis of *Piriformospora indica* on morphological character and photosynthesis pigments in tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *New Cellular and Molecular Biotechnology Journal*, 6: 57-64.
25. Heath, R.L. and L. Packer. 1968. Photoperoxidation in isolated chloroplasts. I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation, *Arch. Bioch. Biophys*, 125: 189-198.
26. Hussain, A.M., H. Rahman, A. Iqbal, M. Shah, M. Irshad, M. Qasim and B. Islam. 2018. Bioremediation of hexavalent chromium by endophytic fungi; safe and improved production of *Lactuca sativa* L. *Journal Chemosphere*, 211: 653-663.
27. Ibrahim, E.A. 2016. Seed priming to alleviate salinity stress in germinating seeds. *Journal of Plant Physiology*, 192: 38-46.
28. Jan, F.G., M. Hamayun, A. Hussain, G. Jan, A. Iqbal, A. Khan and I.J. Lee. 2019. An endophytic isolate of the fungus *Yarrowia lipolytica* produces metabolites that ameliorate the negative impact of salt stress on the physiology of maize. *Journal of BMC microbiology*, 19: 1-10.
29. Jarvis, P.G. and M.S. Jarvis. 1963. The water relations of tree seedlings. IV. Some aspects of the tissue water relations and drought resistance. *Journal of Physiologia plantarum*, 16: 501-516.
30. Jogawat, A., S. Saha, M. Bakshi, V. Dayaman, M. Kumar, M. Dua, A. Varma, R. Oelmüller, N. Tuteja and A.K. Johri. 2013. *Piriformospora indica* rescues growth diminution of rice seedlings during high salt stress. *Journal Plant signaling and behavior*. 8:e26891.
31. Hosseini, M.S., D. Samsampour, M. Ebrahimi and M. Khanahmadi. 2019. Study of Physiological and Biochemical Changes of Iranian Licorice (*Glycyrrhiza Glabra*) under Salinity Stress in Filed Condition. *Journal of Crop Breeding*, 11(29): 193-201 (In Persian).
32. Kalaji, H.M., M.D. Cetner, I.A. Samborska, I. Lukasik, A. Oukarroum, S. Rusinowski, S. Pietkiewicz, M. Świątek and P. Dąbrowski, 2016. Effective microorganisms impact on photosynthetic activity of *Arabidopsis* plant grown under salinity stress conditions. *Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW. Land Reclamation*, 48: 153-163.
33. Karimi, S., A. Yadollahi, R. Nazari-Moghadam, A. Imani and K. Arzani. 2012. In vitro screening of almond (*Prunus dulcis* (Mill.) genotypes for drought tolerance. *Journal Biol Environ Science*, 6: 263-270.
34. Kaur, G. and B.J.B.P. Asthir. 2015. Proline: a key player in plant abiotic stress tolerance. *Journal Biologia Plantarum*, 59: 609-619.
35. Khan, M.N., M.H. Siddiqui, F. Mohammad, M. Naeem and M.M.A. Khan. 2010. Calcium chloride and gibberellic acid protect linseed (*Linum usitatissimum* L.) from NaCl stress by inducing antioxidative defence system and osmoprotectant accumulation. *Journal Acta Physiologiae Plantarum*, 32: 121.
36. Khare, E., J. Mishra and N.K. Arora. 2018. Multifaceted interactions between endophytes and plant: developments and prospects. *Journal Frontiers in microbiology*, 9: 2732.
37. Khodavirdvand, K.R., H. Soltanloo, S.S. Ramazanpour and V. Shariati. 2020. Evaluation of Biochemical Response and Defense Mechanism of Wheat Antioxidant Enzymes to Salinity Stress. *Journal of Crop Breeding*, 12(36): 90-100 (In Persian).
38. Lata, R., S. Chowdhury, S.K. Gond and Jr, J.F. White. 2018. Induction of abiotic stress tolerance in plants by endophytic microbes. *Journal Letters in applied microbiology*, 66: 268-276.
39. Lee, M.H., E.J. Cho, S.G. Wi, H. Bae, J.E. Kim, J.Y. Cho, S. Lee, J.H. Kim and B.Y. Chung. 2013. Divergences in morphological changes and antioxidant responses in salt-tolerant and salt-sensitive rice seedlings after salt stress. *Journal Plant Physiology and Biochemistry*, 70: 325-335.
40. Lehner, A., N. Mamadou, P. Poels, D. Come, C. Bailly and F. Corbineau. 2008. Changes in soluble carbohydrates, lipid peroxidation and antioxidant enzyme activities in the embryo during ageing in wheat grains. *Journal of Cereal Science*, 47: 555-565.
41. Liang, W., X. Ma, P. Wan and L. Liu. 2018. Plant salt-tolerance mechanism: A review. *Journal Biochemical and biophysical research communications*, 495: 286-291.
42. Lichtenthaler, H.K. and C. Buschmann. 2001. Chlorophylls and carotenoids: Measurement and characterization by UV-VIS spectroscopy. *Journal Current protocols in food analytical chemistry*, 1: 3-4.
43. Liu, T., M. Sheng, C.Y. Wang, H. Chen, Z. Li and M. Tang. 2015. Impact of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth, water status, and photosynthesis of hybrid poplar under drought stress and recovery. *Journal Photosynthetica*, 53: 250-258.
44. Lugtenberg, B.J., J.R. Caradus and L.J. Johnson. 2016. Fungal endophytes for sustainable crop production. *Journal FEMS Microbiology Ecology*, 92(12).

45. Molina-Montenegro, M.A., I.S. Acuña-Rodríguez, C. Torres-Díaz and P.E. Gundel. 2018. Root endophytes improve physiological performance and yield in crops under salt stress by up-regulating the foliar sodium concentration. bioRxiv. 435032.
46. Morsy, M., B. Cleckler and H. Armuelles-Millican. 2020. Fungal Endophytes Promote Tomato Growth and Enhance Drought and Salt Tolerance. *Plants*, 9(7): 877.
47. Mucciarelli, M., S. Scannerini, C. Berteà and M. Maffei. 2003. In vitro and in vivo peppermint (*Mentha piperita*) growth promotion by nonmycorrhizal fungal colonization. *Journal New Phytologist*, 158: 579-591.
48. Munns, R. and M. Tester. 2008. Mechanisms of salinity tolerance. *Annu. Rev. Journal Plant Biology*, 59: 651-681.
49. Naveed, M., B. Mitter, T.G. Reichenauer, K. Wiczorek and A. Sessitsch. 2014. Increased drought stress resilience of maize through endophytic colonization by *Burkholderia phytofirmans* PsJN and *Enterobacter* sp. FD17. *Journal Environmental and Experimental Botany*, 97: 30-39.
50. Rawat, L., Y. Singh, N. Shukla and J. Kumar. 2011. Alleviation of the adverse effects of salinity stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) by seed biopriming with salinity tolerant isolates of *Trichoderma harzianum*. *Journal Plant and Soil*, 347: 387.
51. Rho, H., M. Hsieh, S.L. Kandel, J. Cantillo, S.L. Doty and S.H. Kim. 2018. Do endophytes promote growth of host plants under stress? A meta-analysis on plant stress mitigation by endophytes. *Journal Microbial ecology*, 75: 407-418.
52. Rho, H., V. Van Epps, S.H. Kim and S.L. Doty. 2020. Endophytes Increased Fruit Quality with Higher Soluble Sugar Production in Honeycrisp Apple (*Malus pumila*). *Journal Microorganisms*, 8: 699 PP.
53. Sheng, X.F., J.J. Xia, C.Y. Jiang, L.Y. He and M. Qian. 2008. Characterization of heavy metal-resistant endophytic bacteria from rape (*Brassica napus*) roots and their potential in promoting the growth and lead accumulation of rape. *Journal Environmental pollution*, 156: 1164-1170.
54. Siddiqui, M.H., S. Alamri, Q.D. Alsubaie, H.M. Ali, M.N. Khan, A. Al-Ghamdi, A.A. Ibrahim and A. Alsadon. 2020. Exogenous nitric oxide alleviates sulfur deficiency-induced oxidative damage in tomato seedlings. *Journal Nitric Oxide*, 94: 95-107.
55. Soad, A., X. Algam, X. Guan-lin and J. Coosemans. 2005. Delivery Methods for Introducing Endophytic *Bacillus* into Tomato and Their Effect on Growth Promotion and Suppression of Tomato Wilt. *Plant Pathology Journal*, 4: 69-74.
56. Tátrai, Z.A., R. Sanoubar, Z. Pluhár, S. Mancarella, F. Orsini and G. Gianquinto. 2016. Morphological and physiological plant responses to drought stress in *Thymus citriodorus*. *International Journal of Agronomy*.
57. Tefera, T. and Vidal S. 2009. Effect of inoculation method and plant growth medium on endophytic colonization of sorghum by the entomopathogenic fungus *Beauveria bassiana*. *Journal of BioControl*, 54(5): 663-669.
58. Vahabi, K., S.K. Dorcheh, S. Monajembashi, M. Westermann, M. Reichelt, D. Falkenberg, P. Hemmerich, I. Sherameti and R.Oelmüller. 2016. Stress promotes *Arabidopsis-Piriformospora indica* interaction. *Journal Plant signaling and behavior*, 11:e1136763.
59. Yang, B., X. Wang, H. Ma, T. Yang, Y. Jia, J. Zhou and C. Dai. 2015. Fungal endophyte *Phomopsis liquidambari* affects nitrogen transformation processes and related microorganisms in the rice rhizosphere. *Journal Frontiers in microbiology*, 6: 982.
60. Yang, S.H., L.J. Wang and S.H. Li. 2007. Ultraviolet-B irradiation-induced freezing tolerance in relation to antioxidant system in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) leaves. *Journal Environmental and experimental botany*, 60: 300-307.
61. Yemm, E.W. and A. Willis. 1954. The estimation of carbohydrates in plant extracts by anthrone. *Biochemical journal*, 57: 508-514.
62. Yun, P., L. Xu, S.S. Wang, L. Shabala, S. Shabala and W.Y. Zhang. 2018. *Piriformospora indica* improves salinity stress tolerance in *Zea mays* L. plants by regulating Na⁺ and K⁺ loading in root and allocating K⁺ in shoot. *Journal Plant Growth Regulation*, 86: 323-331.
63. Zhang, F., Y. Wang, C. Liu, F. Chen, H. Ge, F. Tian, T. Yang, K. Ma and Y. Zhang. 2019. *Trichoderma harzianum* mitigates salt stress in cucumber via multiple responses. *Journal Ecotoxicology and Environmental Safety*, 170: 436-445.
64. Zhang, S., Y. Gan and B. Xu. 2016. Application of plant-growth-promoting fungi *Trichoderma longibrachiatum* T6 enhances tolerance of wheat to salt stress through improvement of antioxidative defense system and gene expression. *Journal Frontiers in Plant Science*, 7: 1405.
65. Zhang, X., C. Li and Z. Nan. 2010. Effects of cadmium stress on growth and anti-oxidative systems in *Achnatherum inebrians* symbiotic with *Neotyphodium gansuense*. *Journal of Hazardous Materials*, 175: 703-709.

The Role of the Fungal Endophyte *Penicillium Chrysogenum* in Tomato Plant under Salinity Stress

Soheila Aghaei Dargiri¹, Davood Samsampour², Majeed Askari Seyahoei³ and Abdoolnabi Bagheri⁴

1- Ph.D of Department of Horticulture Sciences, Faculty of Agriculture, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

2- Associate Professor of Department of Horticulture Sciences, Faculty of Agriculture, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran, (Corresponding author: Samsampour@hormozgan.ac.ir)

3- Associate Professor of Plant Protection Research Department, Hormozgan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Bandar Abbas, Iran

4- Assistants Professor of Plant Protection Research Department, Hormozgan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Bandar Abbas, Iran

Received: April 3, 2020

Accepted: May 19, 2021

Abstract

Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) is one of the most well-known vegetable species in the world, that its cultivation can be threatened by salinity. Salinity is one of the main abiotic challenges that can negatively affect plant growth and physiology. The effect of the *Penicillium chrysogenum* endophyte fungus on the improvement of quantitative and biochemical traits of tomato plants under salinity stress (treatment of saline well water with different concentrations of (0, 4, 6, and 8 dS / m⁻¹) was investigated in a factorial fully randomized design with three replications at the Hormozgan University greenhouse. The studied traits included plant height; root dry weight; content of chlorophyll *a*, chlorophyll *b*, total chlorophyll and carotenoids; relative leaf water content; content of proline, soluble sugars, malondialdehyde and hydrogen peroxide. Although, salinity significantly reduced the plant height, root dry weight, chlorophyll *a*, chlorophyll *b*, carotenoids and relative leaf water contents, *Penicillium chrysogenum* could overcome these challenges and reduce the negative effects of salinity. The presence of endophytes against its absence at salinity stress (8 ds/m⁻¹) of 26.66, 30.43, 21.72 and 8.47%, respectively, improved the traits of proline, soluble sugars, malondialdehyde and hydrogen peroxide. Our findings confirmed the high potential of *Penicillium chrysogenum* to increase plant fitness, especially under salinity conditions. This issue can be used practically to reduce cultivation restrictions in some areas due to the salinity of the water.

Keywords: Carotenoids, Chlorophyll, Hydrogen peroxide, Malondialdehyde, Proline, Salinity stress