

تأثیر سویه‌های مختلف باکتری سودوموناس بر صفات فیزیولوژیک و اجزای عملکرد سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.) در شرایط تنش خشکی

مینا رفیعی^۱، اصغر رحیمی^{۱*}، آرمان آذری^۱، سید رسول صحافی^۱، احمد آئین^۲ و پژمان خدایگان^۳

^۱ گروه ژنتیک و تولید گیاهی دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران

^۲ مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی جنوب کرمان، جیرفت، ایران

^۳ گروه گیاه‌پزشکی دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۰۴، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۰۸/۲۹)

چکیده

به منظور بررسی سویه‌های مختلف باکتری سودوموناس مشتمل بر گونه‌های فلورسنس، کلرافیس و پوتیدا بر خصوصیات مورفوفیزیولوژیک و عملکرد گیاه سیب‌زمینی رقم سانه تحت تنش خشکی در منطقه جیرفت، آزمایشی به صورت طرح کرت‌های خردشده در قالب طرح پایه بلوک‌های کاملاً تصادفی با سه تکرار در دو سال زراعی ۱۳۹۸-۱۳۹۹ و ۱۳۹۹-۱۴۰۰ انجام شد. عامل اصلی شامل تنش خشکی در سه سطح (۴۰، ۶۵ و ۹۰ میلی‌متر تبخیر از سطح تشتک تبخیر کلاس A) و سویه‌های باکتری سودوموناس در چهار سطح (شاهد، سویه T12 *Pseudomonas fluorescens* RO7، سویه T13 *Pseudomonas putida* RO3، سویه T17 *Pseudomonas chlororaphis* RO1) به عنوان فاکتور فرعی بود. نتایج نشان داد که تیمارهای تنش خشکی اعمال‌شده تأثیری در محتوای کلروفیل a نداشت. استفاده از سویه‌های باکتری سودوموناس محتوای کلروفیل b و کل را افزایش داد. محتوای کاروتنوئید برگ در ۹۰ میلی‌متر تبخیر از سطح تشتک تبخیر با کاربرد باکتری سویه T17 کم‌ترین میزان را نسبت به تیمار بدون باکتری و سویه T12 و T13 نشان داد. کاربرد باکتری سویه T13 بیش‌ترین فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز را در سطوح مختلف تنش خشکی نشان داد. بین سویه‌های متفاوت باکتری سودوموناس و تیمار بدون کاربرد باکتری تفاوتی در فعالیت آنزیم پراکسیداز برگ در سطوح مختلف تنش خشکی مشاهده نشد. بیش‌ترین فعالیت آنزیم کاتالاز برگ با کاربرد سویه T12 و T17 باکتری مشاهده شد. کاربرد سویه‌های باکتری سودوموناس منجر به افزایش معنی‌دار وزن خشک اندام هوایی، وزن خشک غده و وزن کل غده در بوته نسبت به تیمار بدون باکتری در همه سطوح تنش خشکی شد.

واژه‌های کلیدی: آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی، تنش خشکی، سودوموناس، عملکرد غده، وزن خشک

مقدمه

گیاهان زراعی می‌شود (Jaleel et al., 2007). خشکی به تنهایی مسبب ۴۷ درصد از کاهش عملکرد محصولات زراعی بوده و مدل‌های رشد محصول پیش‌بینی می‌کنند که این مسئله در آینده شدیدتر خواهد بود (Farooq et al., 2012). کمبود آب یا

گیاهان زراعی در معرض چندین تنش محیطی از جمله افزایش دما، خشکی، شوری و سمیت آلاینده‌ها قرار دارند که همگی بر رشدونمو گیاهان تأثیر می‌گذارند و در نتیجه مانع بهره‌وری

* نویسنده مسؤول، نشانی پست الکترونیکی: rahimiasg@gmail.com

آمریکای لاتین از ۳۲ میلیون تن در سال ۱۹۶۱ به ۲۲۶ میلیون تن در سال ۲۰۲۰ افزایش یافته است که در کل بیش از شش برابر افزایش یافته است. تخمین زده می‌شود که از سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۳۰، میزان سهم سیب‌زمینی در غذای جهانی از ۳/۷۴ درصد به ۶/۴۲ درصد افزایش یابد (Dongyu, 2022). این گیاه یکی از حساس‌ترین محصولات زراعی به خشکی است که این امر به دلیل سیستم ریشه کم عمق این گیاه (Moon et al., 2018) و همچنین تولید این گیاه در خاک‌های با بافت سبک تا متوسط با ظرفیت نگهداری آب کم و متوسط است. هدف اصلی مدیریت آبیاری سیب‌زمینی، به حداقل رساندن نوسانات رطوبت خاک است (Ramirez et al., 2015). شدت و مدت وقوع کمبود رطوبت خاک طی مراحل مختلف رشد سیب‌زمینی بر عملکرد این گیاه تأثیرگذار است. سیب‌زمینی به‌ویژه در هنگام آغازش و رشد اولیه غده به تنش آب حساس است، به طوری که تنش خشکی در این مرحله موجب کاهش سرعت غده‌زایی و طولانی‌تر شدن دوره تشکیل غده، کاهش تعداد غده و رشد آن و در نتیجه، کاهش عملکرد می‌شود (Banik et al., 2016).

در چند دهه اخیر، کشاورزی بر پایه مصرف کودهای زیستی با هدف حذف یا تقلیل چشمگیر در مصرف نهاده‌های شیمیایی مورد توجه قرار گرفته است و می‌تواند به عنوان یک راهکار مفید در جهت کاهش و تعدیل هر چه بیشتر اثرات تنش خشکی در گیاهان زراعی مطرح باشد (خانی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۵). توانایی باکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPR) برای تحریک رشد و محافظت گیاه در برابر تنش‌های محیطی، شیوه‌ای ارزان، سازگار با محیط‌زیست و امیدوارکننده برای کاهش اثرات خشکی بر محصولات است (Ojuederie et al., 2019). باکتری‌های محرک رشد گیاه می‌توانند به طور مستقیم موادی تولید کرده و در اختیار گیاهان قرار دهد که جذب برخی مواد مغذی توسط گیاه از محیط را تسهیل کند. این باکتری‌ها همچنین می‌توانند به صورت غیرمستقیم از اثرات مضر یک یا چند میکروارگانیسم گیاهی بر رشد گیاه جلوگیری کنند (Ijaz et al., 2019). سودوموناس‌ها ریزوباکتری‌های

تنش خشکی به عنوان یکی از محدودکننده‌ترین عوامل در رشد و عملکرد گیاه در بسیاری از مناطق جهان در تولید محصولات کشاورزی در نظر گرفته می‌شود. تحت تنش خشکی، پتانسیل‌های آبی در ناحیه ریشه منفی می‌شوند و در نتیجه دسترسی به آب کاهش می‌یابد که بر رشد و نمو گیاه تأثیر می‌گذارد (Garcia-Caparrós et al., 2019). خشکی با کاهش قابل‌توجهی در سرعت رشد محصول و تجمع زیست‌توده، رشد و نمو گیاه را به شدت تحت‌تأثیر قرار می‌دهد (Ansary et al., 2012). تأثیر تنش خشکی با تغییر در روابط آبی، جذب مواد مغذی، فرآیندهای بیوشیمیایی و فیزیولوژیک، ساختار غشایی و اندامک‌های درون سلولی مشخص می‌شود (Nahar et al., 2016). خشکی به عنوان یکی از مهم‌ترین تنش‌های محیطی در نتیجه تجمع گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) باعث عدم تعادل متابولیک در گیاهان و کاهش قابل توجه عملکرد محصولات می‌شود (Chandrasekaran and Paramasivan, 2022). عدم تعادل بین تجمع ROS و سامانه‌های دفاع آنتی‌اکسیدان در تنش خشکی، منجر به بروز آسیب اکسیداتیو می‌شود (Shemi et al., 2021). سیستم‌های دفاعی گیاهان در مقابل این گونه‌های فعال اکسیژن تحریک می‌شوند. از جمله این سامانه‌ها، آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی مانند سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و پراکسیدازها (آسکوربات پراکسیداز و گایاکول پراکسیداز) است. آنزیم سوپراکسید دیسموتاز اولین سد دفاعی را تشکیل می‌دهد که رادیکال‌های سوپراکسید را به پراکسید هیدروژن تبدیل می‌کند. سپس پراکسید هیدروژن می‌تواند توسط آنزیم آسکوربات پراکسیداز در چرخه آسکوربات - گلوکاتیون که در کلروپلاست عمل می‌کند یا توسط گایاکول پراکسیداز در دیواره سلولی و سیتوپلاسم و یا توسط کاتالاز در پراکسی‌زوم و میتوکندری به آب و اکسیژن مولکولی تجزیه گردد (Pal et al., 2013).

سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.) در حال حاضر سومین محصول مهم غذایی در جهان است و دارای اهمیت زیادی برای کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه است (Hill et al., 2021). تولید سیب‌زمینی در آسیا، آفریقا و

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی تأثیر سویه‌های مختلف باکتری سودوموناس گونه‌های فلورسنس، کلرافیس و پوتیدا بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت، محتوای رنگدانه‌های برگ و صفات مرتبط با عملکرد گیاه سیب‌زمینی رقم ساته در شرایط تنش خشکی آزمایشی در مزرعه تحقیقاتی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی جنوب استان کرمان به مدت دو سال زراعی ۱۳۹۸-۱۳۹۹ و ۱۳۹۹-۱۴۰۰ انجام شد. این آزمایش به صورت طرح کرت‌های خردشده در قالب طرح پایه بلوک‌های کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. عامل اصلی آزمایش شامل تنش خشکی در سه سطح (۴۰، ۶۵ و ۹۰ میلی‌متر تبخیر از سطح تشتک تبخیر کلاس A) و سویه‌های باکتری سودوموناس در چهار سطح (شاهد، سویه T12 (*Pseudomonas fluorescens* RO7)، سویه T13 (*Pseudomonas putida* RO3) و سویه T17 (*Pseudomonas chlororaphis* RO1) به عنوان فاکتور فرعی بود. گونه‌های مورد استفاده در این تحقیق از کلکسیون میکروبی گروه تولیدی ریشه‌گستر ویرا انتخاب شده و در آزمون‌های مختلف به منظور بررسی خصوصیات مورد بررسی قرار گرفته بودند. سویه‌های مذکور در آزمون‌های متعددی که توان بهبوددهندگی رشد را نمایش داده است مطلوب بوده و قابلیت انحلال فسفر نامحلول، انحلال روی، تولید سیدروفور، تولید اکسین، تولید acc دامیناز در آنها مشاهده شده بود. سویه‌های مذکور دارای شناسنامه دقیق فنوتیپی بوده و قبلاً براساس توالی یابی بخشی از ناحیه 16S rDNA به عنوان یک استاندارد در باکتری‌شناسی، شناسایی مولکولی شده‌اند. سویه‌ها با رس‌شمار OQ345925، OQ345926 و MT540543 به ترتیب مربوط به سویه T13، T12 و T17 در پایگاه NCBI ثبت بوده‌اند. علاوه بر آن این سویه‌ها تحت عنوان تجاری باکتولند با فرمولاسیون مایع تولید و در بازار عرضه می‌گردند. کاشت به صورت جوی پشته و کاملاً یکنواخت، با استفاده از دستگاه سیب‌زمینی کار دو ردیفه اجرا شد. فاصله پشته‌ها از هم ۱۰۰ سانتی‌متر بود که در هر

هوازی و گرم منفی، باریک، میله‌ای شکل و قطبی هستند و می‌توانند به صورت انبوه تولید شوند و به سرعت در ریزوسفر تکثیر می‌شوند. سودوموناس‌ها متابولیت‌های زیست‌فعال تولید می‌کنند و به شدت با سایر میکروارگانیسم‌ها رقابت می‌کنند (Ahmad and Siddiqui, 2021). سویه‌های مختلف سودوموناس از راه‌های مختلفی مانند القای مقاومت و ایمنی گیاه، تغییر مورفولوژی رشد گیاه، تحمل تنش‌های محیطی و استفاده از مواد معدنی، اثرات مثبتی بر گیاهان دارند (Gu et al., 2020). یکی از مؤثرترین گونه‌های جنس سودوموناس، گونه سودوموناس پوتیدا است که به عنوان تلقیح در گیاهان زراعی برای افزایش رشد، عملکرد و تحمل به خشکی استفاده می‌شود (Saglam et al., 2022). *P. putida* H-2-3 با سنتز جیبرلین رشد گیاه را در شرایط تنش خشکی و شوری در سویا بهبود بخشید (Sen and Mohapatra, 2022). سودوموناس فلورسنس اغلب در خاک و آب یافت می‌شود و یکی از باکتری‌های محرک رشد گیاه است که به‌طور گسترده به عنوان یک عامل کنترل بیولوژیک برای پاتوژن‌های گیاهی و همچنین افزایش مقاومت و عملکرد محصولات زراعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. سودوموناس فلورسنس تأثیر مثبت و معنی‌داری بر طول ریشه، ارتفاع بوته، تعداد پنجه، تعداد سنبله، وزن خشک ریشه، وزن کل دانه و وزن خشک اندام هوایی گندم نشان داد (Mahmud and Khudhur, 2022). *Pseudomonas chlororaphis* O6 باعث ایجاد تحمل سیستمیک در گیاهان در برابر تنش خشکی می‌شود. یک ترکیب فرار تولیدشده توسط این باکتری باعث بسته‌شدن نسبی روزنه‌ها می‌شود، بنابراین، از دست دادن آب از گیاه را محدود می‌کند. تحمل به خشکی ناشی از سودوموناس کلرافیس O6 با کاهش اندازه روزنه در گیاهان با ریشه‌های کلون‌شده توسط این باکتری ارتباط دارد (Cho et al., 2018). با توجه به توسعه روزافزون تنش خشکی و ضرورت افزایش عملکرد در واحد سطح با بهره‌گیری از روش‌های سازگار با محیط‌زیست و همچنین توانایی باکتری‌های سودوموناس در تعدیل اثرات تنش خشکی، ایده انجام این تحقیق شکل گرفت.

برش‌های تهیه‌شده به آون با دمای ۷۵ درجه سلسیوس منتقل و پس از خشک‌شدن و رسیدن به وزن ثابت، از دستگاه خارج و مجدداً با ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم وزن شد (اسکندری و همکاران، ۱۳۹۰). برخی مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه در جدول ۱ و میانگین حداکثر و حداقل دمای (درجه سانتی‌گراد) ماهانه جیرفت در دو سال زراعی در شکل ۱ و سایر خصوصیات اقلیمی جیرفت در دو سال زراعی شکل ۱۳۹۸-۱۳۹۹ و ۱۳۹۹-۱۴۰۰ در جدول ۲ آورده شده است.

برای اندازه‌گیری میزان کلروفیل a, b و کاروتنوئیدها، از نمونه‌های برگ‌گی انتخاب‌شده (مرحله اوایل پرشدن غده) به صورت تصادفی از کل برگ‌های بوته عصاره‌گیری با استون ۸۰ درصد انجام و محلول حاصل به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۳۵۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شد. سپس میزان جذب محلول در طول موج‌های ۴۸۰، ۵۱۰، ۶۴۵، ۶۵۲ و ۶۶۳ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر خوانده و با استفاده از فرمول‌های زیر، اعداد برحسب میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر برگ به دست آمد (Arnon, 1949).

$$\text{Chl a (mg/g FW)} = 12.7 (D_{663}) - 2.69 (D_{645}) V/1000 \times W$$

$$\text{Chl b (mg/g FW)} = 22.9 (D_{645}) - 4.68 (D_{663}) V/1000 \times W$$

$$\text{Chl a+b (mg/g FW)} = (D_{652}) - 1000/34.5 \times V/1000 \times W$$

$$\text{Car (mg/g FW)} = 7.6 (D_{470}) - 1.49 (D_{510}) V/1000 \times W$$

D: میزان جذب نور، V: حجم نهایی عصاره، W: وزن تر نمونه

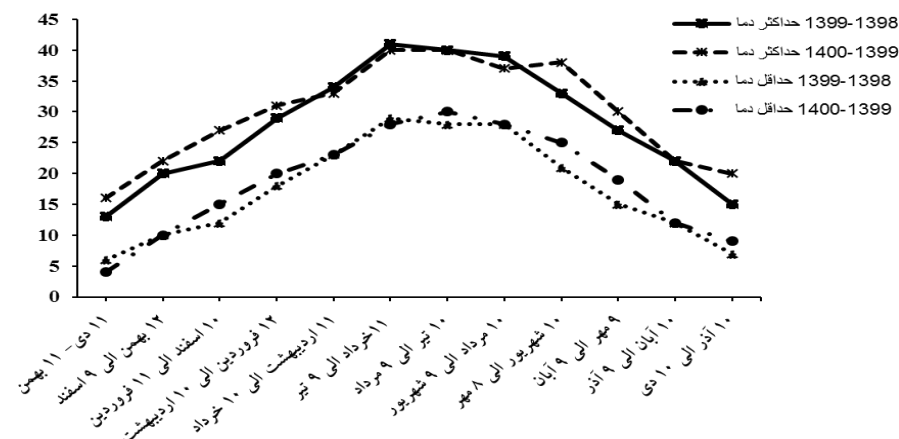
(گرم)

برای اندازه‌گیری آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، ابتدا عصاره گیاهی تهیه شد. برای عصاره‌گیری از نمونه‌های برگ‌گی ابتدا ۰/۵ گرم نمونه برگ که در نیتروژن مایع نگهداری شده در هاون چینی کاملاً خرد شد. سپس ۲ میلی‌لیتر بافر استخراج را به آن اضافه نموده و در داخل هاون چینی کاملاً هم‌وزن‌نیزه شد. مخلوط حاصل را به مدت ۱۵ دقیقه با دور ۱۳۰۰۰ دور در دقیقه در دمای ۴ درجه سلسیوس سانتریفیوژ و پس از آن فاز بالایی جهت خواندن فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان جدا شد. برای اندازه‌گیری آنزیم سوپراکسید دیسموتاز از روش Beauchamp و Fridovich (۱۹۷۱) استفاده شد. این اندازه‌گیری براساس توانایی آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در متوقف‌کردن احیای نیتروبلوتترازولیوم توسط رادیکال‌های سوپراکسید در حضور ریوفلاوین صورت گرفت. در این روش ۵۰ میکرولیتر از عصاره استخراج با یک میلی‌لیتر محلول اندازه‌گیری سوپراکسید دیسموتاز

پشته دو ردیف سیب‌زمینی با آرایش کاشت ۵۰ سانتی‌متر فاصله بین ردیف و ۲۰ سانتی‌متر فاصله غده‌ها روی هر ردیف (برای رسیدن به تراکم ۱۰ غده در مترمربع) کشت شدند. هر کرت آزمایشی شامل چهار ردیف کشت به طول ۵ متر بود. فاصله کرت‌ها از یکدیگر یک متر و فاصله بلوک‌ها از هم دو متر در نظر گرفته شد. آبیاری کرت‌ها به صورت آبیاری قطره‌ای و با استفاده از نوارهای آبیاری تیپ با فاصله قطره چکان‌های ۲۰ سانتی‌متر انجام گرفت. در مرحله رشد رویشی و قبل از آغاز غده‌دهی و هنگامی که ۶۰ درصد پوشش کانوپی بسته شد (کد ۳۰۶ براساس BBCH) (Kacheyo et al., 2021)، به منظور اعمال تیمار باکتری سودوموناس، ابتدا مقدار یک کیلوگرم از ترکیب حاوی هر کدام از سویه‌های باکتری را در یک لیتر آب به مدت یک ساعت ریخته و طی این مدت، چند بار هم‌زده شد. بعد از آن، این سوسپانسیون را به مدت نیم ساعت دیگر در همان میزان آب به صورت پیوسته هم‌زده و بلافاصله در ۳۶ لیتر آب به حجم رسید. در هر کرت ۴ لیتر از مخلوط حاصل در زیر نوارهای آبیاری اضافه شد که باکتری همراه با آب آبیاری به محیط ریشه منتقل شد. در مرحله آغاز غده‌دهی، تنش رطوبتی در سه سطح (۴۰، ۶۵ و ۹۰ میلی‌متر تبخیر از سطح تشتک تبخیر کلاس A) اعمال شد. صفات مورد اندازه‌گیری شامل برخی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان (کاتالاز، گایاکول پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز)، رنگدانه‌های برگ‌گی (کلروفیل a, b و کل و کاروتنوئید)، تعداد غده، عملکرد تازه و خشک غده و عملکرد زیست‌توده بود. به منظور اندازه‌گیری وزن خشک زیست‌توده، بعد از جداکردن اندام هوایی بوته از ریشه، آن‌ها را به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۷۵ درجه سلسیوس در آون قرار داده و بعد از خشک‌شدن با ترازو (با دقت ۰/۰۰۱) براساس واحد گرم اندازه‌گیری شدند. برای تعیین تعداد و وزن غده در هر بوته، از پنج بوته انتخاب‌شده از هر کرت، تعداد و وزن غده‌های آن‌ها شمارش و اندازه‌گیری و سپس تعداد و وزن غده در هر بوته برای هر تیمار آزمایشی محاسبه شد. برای تعیین ماده خشک غده ابتدا از غده، برش‌هایی به ضخامت ۴-۲ میلی‌متر تهیه و سپس ۱۰۰ گرم از

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و شیمیایی اصلی خاک مورد استفاده

بافت	رس	سیلت	شن	آهک	Mn	Cu	Zn	Fe	K	P	N	EC	pH
لوم شنی	۱۰/۶	۳۰	۵۹/۴	۱۱/۲۵	۳/۱۷	۱/۲۳	۰/۸۵	۶/۵۲	۵۶۲	۲۶	۰/۰۲۵	۱/۳	۷/۲



شکل ۱- میانگین حداکثر و حداقل دمای (درجه سانتی‌گراد) ماهانه جیرفت در دو سال زراعی

جدول ۲- میانگین میزان بارندگی (mm)، روزهای آفتابی، هوای ابری (درصد) و رطوبت هوا (درصد) جیرفت در دو سال زراعی

ماه	۱۳۹۹-۱۳۹۸				۱۴۰۰-۱۳۹۹			
	۱۱-دی	۱۲ فروردین	۱۰ تیر	۹ مهر	۱۱-دی	۱۲ فروردین	۱۰ تیر	۹ مهر
میزان بارندگی	۳۳/۷۹	۴/۱	۰/۱۳۳	۳/۹۳	۱/۴	۱/۸	۰/۱	۰
روزهای آفتابی	۸۰	۸۸	۹۲	۹۱	۹۰	۸۹	۹۲	۹۲
هوای ابری	۱۷	۱۲	۶	۹	۷/۶۶	۱۱	۴/۳۳	۹/۶۶
رطوبت هوا	۱۱۱	۵۷	۴۰	۸۳	۶۱	۴۴	۳۴	۷۳

شده. در این روش ۳ میلی‌لیتر مخلوط واکنش حاوی ۲/۷۷ میلی‌لیتر بافر پتاسیم فسفات ۵۰ میلی‌مولار (pH = 7)، ۱۰۰ میکرولیتر آب اکسیژنه ۱ درصد، ۱۰۰ میکرولیتر گایاکول (Guaiacol) ۱۳ میلی‌مولار و ۳۳ میکرولیتر عصاره آنزیمی بود. افزایش جذب به دلیل اکسیداسیون گایاکول با دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۴۷۰ نانومتر به مدت سه دقیقه اندازه‌گیری شد.

برای اندازه‌گیری آنزیم کاتالاز از روش Dhindsa و همکاران (۱۹۸۱) استفاده شد. در این روش ۵۰ میکرولیتر از

شامل ۵۰ میلی‌مول بافر فسفات پتاسیم (pH = 7/8)، نیتروبلوتترازولیوم ۷۵ میکرومولار، ال‌متیونین ۱۳ میلی‌مولار، EDTA ۰/۱ میلی‌مولار و ریبولوین ۲ میلی‌مولار است مخلوط شد. جهت انجام واکنش مخلوط به مدت ۱۵ دقیقه در اتاقک نور قرار داده و میزان جذب نوری آن با دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۶۰ نانومتر خوانده شد.

برای اندازه‌گیری آنزیم گایاکول پراکسیداز از روش Chance و Maehly (۱۹۹۵) استفاده شد. فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز با استفاده از پیش‌ماده گایاکول اندازه‌گیری

یکی از مکانیسم‌های پاسخ به تنش غیرزنده است (Handayani and Watanabe, 2020). برخی از محققان کاهش محتوای کلروفیل را در شرایط محدودیت آب گزارش کرده‌اند در حالی که برخی دیگر بیان کرده‌اند که سنتز کلروفیل در شرایط تنش یک مکانیسم تحمل در گیاهان است (خانی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۵). در پژوهشی روی سیب‌زمینی در شرایط تنش خشکی (اعمال تنش ۳۶ روز پس از کاشت) مشاهده گردید که بین گیاهان شاهد و تحت تنش تفاوت معنی‌داری در محتوای کلروفیل مشاهده نشد (Alvarez-Morezuelas et al., 2022). با انجام پژوهشی که الحوشان و همکاران (۱۳۹۸) روی ده رقم مختلف سیب‌زمینی تحت تأثیر تنش کم آبی انجام دادند گزارش شد که در تیمار آبیاری ۸۰٪ در مقایسه با تیمار آبیاری ۳۰٪ تخلیه آب قابل دسترس در خاک در ارقام مورد مطالعه محتوای کلروفیل a کاهش یافت و بیشترین میزان کاهش محتوای کلروفیل a در رقم سائته (۴۳٪/۲) و کم‌ترین میزان این صفت در رقم ساتینا (۶/۸٪) مشاهده شد.

محتوی کلروفیل b برگ: تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که کلروفیل b تنها تحت تأثیر سال، برهمکنش خشکی در سال و برهمکنش خشکی، سال و باکتری قرار گرفت (جدول ۳). با توجه به شکل ۱ و جدول ۲، مشخص می‌شود که در زمان نمونه‌برداری برای صفات فیزیولوژیک (کمی قبل از شروع غده‌بندی) تعداد روزهای آفتابی و همچنین دمای محیط در سال دوم، بیشتر از سال اول بوده و با توجه به نقش محافظتی و کمکی کلروفیل b، افزایش این رنگیزه در سال دوم قابل انتظار است. اما رفتار سویه‌های باکتری در سال‌های مختلف و دوره‌های آبیاری متفاوت، متغیر بود به طوری که مقایسه میانگین سال اول آزمایش (جدول ۲) نشان داد که در تیمار شاهد (۴۰ میلی‌متر تبخیر از سطح تشتک تبخیر) با کاربرد باکتری سویه T13 بیش‌ترین محتوای کلروفیل b مشاهده شد و کم‌ترین میزان این صفت در سویه T12 باکتری بدست آمد که تفاوت معنی‌داری با شاهد و سویه T17 نداشت. در خشکی ملایم (۶۵ میلی‌متر تبخیر از سطح تشتک تبخیر) بیش‌ترین محتوای کلروفیل b در تیمار شاهد (بدون باکتری) و کم‌ترین میزان این

عصاره استخراج با یک میلی‌لیتر از محلول اندازه‌گیری کاتالاز که شامل ۵۰ میلی‌مول بافر پتاسیم (pH=۷) و ۱۵ میکرومول پراکسید هیدروژن است مخلوط و سپس جذب آن با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۲۴۰ نانومتر به مدت سه دقیقه خوانده شد.

تجزیه واریانس مرکب پس از آزمون همگن بودن خطاها، واریانس خطای پلات‌های فرعی بر مبنای آزمون بارتلت با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۲ مورد تجزیه قرار گرفت. سطوح تنش خشکی و باکتری سودوموناس به عنوان فاکتور ثابت و سال به عنوان فاکتور تصادفی در نظر گرفته شد و بر اساس امید ریاضی میانگین مربعات آزمون F انجام شد. همچنین مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

نتایج و بحث

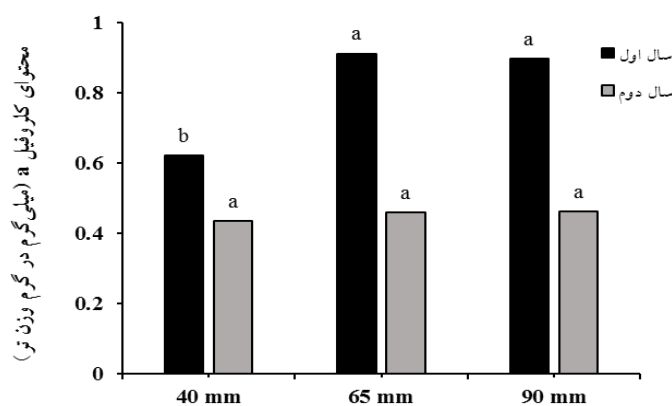
محتوی کلروفیل a برگ: نتایج تجزیه واریانس داده‌های محتوای کلروفیل a برگ حاکی از آن است که این صفت به طور معنی‌داری تحت تأثیر سال و خشکی در سال قرار گرفت (جدول ۳).

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها در سال اول آزمایش نشان داد که با افزایش شدت تنش خشکی محتوای کلروفیل a به طور معنی‌داری نسبت به شاهد (۴۰ میلی‌متر تبخیر از سطح تشتک تبخیر) افزایش یافت با این حال در بین تیمارهای تنش خشکی (۶۵ و ۹۰ میلی‌متر تبخیر از سطح تشتک تبخیر) تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. در سال دوم آزمایش بین سطوح شاهد و تنش خشکی اختلاف معنی‌داری در محتوای کلروفیل a وجود نداشت (شکل ۲). علت افزایش کلروفیل می‌تواند به این دلیل باشد که بر اثر کمبود آب قابل‌استفاده خاک، به دلیل کاهش نیروی تورژسانس، توسعه سلول‌ها کاهش یافته و سبب افزایش تعداد سلول در واحد سطح و وزن برگ می‌شود که این تعداد بیشتر سلول، افزایش تعداد مولکول‌های کلروفیل a را به همراه دارد. گزارش شده است که کاهش سطح برگ منجر به تجمع کلروفیل در برگ می‌شود و افزایش محتوای کلروفیل

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس مرکب محتوای کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل a+b، کاروتنوئید و محتوای نسبی آب برگ سیب‌زمینی در طی دو سال آزمایش

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات		
		کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل a+b
سال (Y)	۱	۲/۳۱۶**	۲۹/۶۲۷**	۱۵/۳۷۵**
سال × تکرار	۴	۰/۰۵۴	۰/۰۱۴	۰/۰۷۸
خشکی (D)	۲	۰/۱۹۲ ns	۰/۴۲۹ ns	۰/۴۰۱ ns
خشکی × سال	۳	۰/۱۳۴**	۰/۶۳۶**	۱/۲۳۵**
خطای a	۲	۰/۰۰۶	۰/۰۹۹	۰/۰۴۱
سودوموناس (P)	۳	۰/۰۰۵ ns	۰/۰۱۳ ns	۰/۰۱۰ ns
Y×P	۲	۰/۰۳۲ ns	۰/۰۹۷ ns	۰/۰۹۸ ns
D×P	۶	۰/۰۱۵ ns	۰/۲۶۳ ns	۰/۳۲۳ ns
Y×D×P	۶	۰/۰۲۷ ns	۰/۴۶۵**	۰/۳۸۳**
خطای b	۳	۰/۰۱۵۴	۰/۰۳۶	۰/۱۱۶
ضریب تغییرات	-	۱۹/۷۰	۲۸/۷۷	۱۹/۷۵
		۱۷/۲۱		

در هر ستون تیمارهای دارای حروف مشترک براساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد با هم تفاوت معنی‌دار ندارند.



شکل ۲- تغییرات محتوای کلروفیل a برگ (میلی‌گرم بر گرم وزن تر) سیب‌زمینی تحت تأثیر تنش خشکی در سال اول و دوم. در هر سال، در هر ستون تیمارهای دارای حروف مشترک براساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد با هم تفاوت معنی‌دار ندارند.

صفت با کاربرد سویه باکتری T17 بدست آمد که با سایر تیمارهای باکتری تفاوت معنی‌داری نشان نداد. با افزایش خشکی به ۹۰ میلی‌متر تبخیر از سطح تشنگ تبخیر (تنش شدید) بیش‌ترین محتوای کلروفیل b به ترتیب با کاربرد سویه T12 و T17 و کم‌ترین میزان این صفت در تیمار بدون باکتری مشاهده شد که تفاوت معنی‌داری با سویه T12 نداشت. در تنش شدید (۹۰ میلی‌متر

صفت با کاربرد سویه باکتری T17 بدست آمد که با سایر تیمارهای باکتری تفاوت معنی‌داری نشان نداد. با افزایش خشکی به ۹۰ میلی‌متر تبخیر از سطح تشنگ تبخیر (تنش شدید) بیش‌ترین محتوای کلروفیل b به ترتیب با کاربرد سویه T12 و T17 و کم‌ترین میزان این صفت در تیمار بدون باکتری مشاهده شد. بیش‌ترین محتوای کلروفیل b در سال دوم آزمایش در تیمار شاهد (۴۰ میلی‌متر تبخیر از

جدول ۴- تغییرات محتوی کلروفیل b، محتوی کلروفیل a+b برگ (میلی گرم بر گرم وزن تر) سیب زمینی در اثر تلقیح سویه های مختلف باکتری سودوموناس در هر سطح آبیاری در طی دو سال آزمایش

محتوی کلروفیل a+b		محتوی کلروفیل b		سویه های باکتری	سطح آبیاری
سال اول	سال دوم	سال اول	سال دوم		
۰/۷۹ g	۲/۷۹ a	۰/۳۶ d	۲/۳۹ a	بدون باکتری	
۱/۱۵ de	۲/۲۷ bc	۰/۳۶ d	۱/۸۸ b-d	T12	۴۰ میلی متر تبخیر
۰/۹۰ fg	۱/۷۸ de	۰/۶۳ a	۱/۴۱ ef	T13	از تشتک تبخیر
۱/۰۹ ef	۱/۶۱ ab	۰/۴۰ cd	۲/۰۳ a-c	T17	
۱/۲۳ b-e	۲/۱۲ b-d	۰/۶۱ a	۱/۶۸ c-e	بدون باکتری	
۱/۳۷ a-d	۱/۵۹ e	۰/۵۲ ab	۱/۰۳ fg	T12	۶۵ میلی متر تبخیر
۱/۴۶ ab	۲/۳۴ bc	۰/۴۸ a-c	۱/۹۶ a-c	T13	از تشتک تبخیر
۱/۴۸ a	۱/۴۰ e	۰/۴۲ bc	۰/۹۳ g	T17	
۱/۴۹ a	۲/۰۵ cd	۰/۳۱ de	۱/۵۳ d-f	بدون باکتری	
۱/۳۹ a-c	۲/۶۲ ab	۰/۵۲ ab	۲/۱۱ ab	T12	۹۰ میلی متر تبخیر
۱/۵۵ a	۲/۳۰ bc	۰/۲۰ e	۱/۸۷ b-d	T13	از تشتک تبخیر
۱/۲۰ c-e	۲/۳۴ bc	۰/۵۷ a	۱/۹۵ b-d	T17	

در هر ستون تیمارهای دارای حروف مشترک براساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد با هم تفاوت معنی دار ندارند.

می شود. ترشحات باکتری در ناحیه ریشه باعث تحریک تولید محافظ های اسمزی مختلف می شود که منجر به بهبود تنظیم آب می شود (Jamil et al., 2018). گزارش شده است که با کاربرد سویه های مختلف باکتری سودوموناس در شرایط تنش خشکی غلظت کلروفیل گیاه کتان افزایش یافت که ممکن است به دلیل افزایش سرعت فتوسنتز که احتمالاً مربوط به تعداد زیادی کلروپلاست در سلول های پارانشیم مزوفیل برگ ها باشد (Rahimzadeh and Pirzad, 2017). تلقیح همزمان با *Pseudomonas spp.* و *Azospirillum brasilense* محتوای کلروفیل b در گیاه خیار را ۳۱ درصد در شرایط تنش خشکی افزایش داد (Fioreze et al., 2020).

محتوی کلروفیل a+b برگ: نتایج تجزیه واریانس داده های محتوای کلروفیل کل نشان داد که این صفت به طور معنی داری تحت تأثیر سال، برهمکنش سال در خشکی و برهمکنش باکتری، خشکی و سال قرار گرفت (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین محتوای کلروفیل a+b در سال اول آزمایش نشان داد

تبخیر از سطح تشتک تبخیر) با وجود اینکه بین تیمارهای بدون باکتری و کاربرد سویه های مختلف باکتری تفاوت معنی داری مشاهده نشد اما با کاربرد باکتری سویه T12 محتوای کلروفیل بیش تری نسبت به تیمار بدون باکتری مشاهده شد (جدول ۴). محتوای کلروفیل به عنوان شاخص تنش گیاه شناخته می شود. در شرایط تنش خشکی، فعالیت رادیکال های آزاد اکسیژن افزایش یافته که با پراکسیداسیون و تجزیه کلروفیل باعث آسیب به ساختمان کلروپلاست و فتوسیستم نوری کلروفیل می گردد (Mehrasa, et al., 2022). کاهش رنگدانه های فتوسنتزی تحت سطوح بالای تنش خشکی به دلیل افزایش فعالیت رادیکال های آزاد در شرایط تنش است که به نوبه خود میزان رنگدانه های فتوسنتزی را تحت تنش خشکی کاهش می دهد (Sabeti et al., 2019). تلقیح با باکتری سودوموناس در شرایط تنش خشکی می تواند منجر به افزایش فعالیت فتوسنتزی به دلیل بهبود تعادل هورمونی و کاهش تولید اتیلن شود، بنابراین از تجزیه پروتئین های کلروفیل جلوگیری

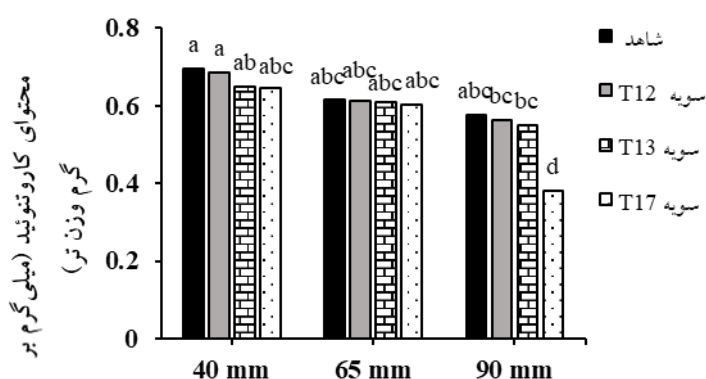
که در تیمار شاهد (۴۰ میلی‌متر تبخیر از سطح تشتک تبخیر) استفاده از سویه‌های مختلف باکتری سودوموناس محتوای کلروفیل a+b را نسبت به تیمار بدون باکتری افزایش معنی‌داری داد. در آبیاری ۶۵ میلی‌متر تبخیر از سطح تشتک تبخیر با وجود اینکه بین تیمار بدون باکتری و سویه‌های T12 و T13 تفاوت معنی‌داری در میزان این صفت مشاهده نشد اما با کاربرد باکتری سویه T17 محتوای کلروفیل a+b نسبت به تیمار شاهد (بدون مصرف باکتری) افزایش معنی‌داری یافت. با افزایش تنش خشکی به ۹۰ میلی‌متر تبخیر از سطح تشتک تبخیر با اینکه بیش‌ترین محتوای کلروفیل a+b با کاربرد سویه T13 باکتری مشاهده شد اما تفاوت معنی‌داری با شاهد و سویه T12 نشان نداد و کم‌ترین میزان این صفت در سویه T17 بدست آمد که تفاوت معنی‌داری با سویه T12 نداشت. در سال دوم آزمایش در تیمار ۴۰ میلی‌متر تبخیر از سطح تشتک تبخیر کم‌ترین محتوای کلروفیل a+b با کاربرد سویه T13 نسبت به شاهد (بدون مصرف باکتری) مشاهده شد. در تنش خشکی ملایم (۶۵ میلی‌متر تبخیر از سطح تشتک تبخیر) بیش‌ترین محتوای کلروفیل a+b در تیمار بدون باکتری و کاربرد باکتری سویه T13 و کم‌ترین میزان این صفت در سویه‌های باکتری T12 و T17 بدست آمد. با افزایش تنش خشکی به ۹۰ میلی‌متر تبخیر از سطح تشتک تبخیر استفاده از سویه‌های مختلف باکتری سودوموناس محتوای کلروفیل a+b تغییر معنی‌داری را نشان نداد و فقط استفاده از سویه T12 محتوای کلروفیل a+b را نسبت به تیمار بدون مصرف باکتری افزایش معنی‌داری داد (جدول ۴).

بهبود غلظت کلروفیل در شرایط تنش خشکی با کاربرد ریزو باکتری‌های محرک رشد گیاه ممکن است به علت سنتز بیشتر رنگدانه‌های فتوسنتزی از طریق هدایت روزه‌ای بیشتر و افزایش سطح فتوسنتزی و یا از طریق افزایش جذب آب و مواد مغذی باشد. همچنین جذب عناصر غذایی نظیر نیتروژن، آهن و منیزیم با کاربرد این باکتری‌ها می‌تواند یکی از دلایل افزایش کلروفیل برگ باشد (Mohammadi et al., 2021). باکتری *P. simiae* سویه AU میزان کلروفیل کل برگ در گیاه سویا

تحت تنش خشکی در مقایسه با گیاهان شاهد ۷۳/۵۸ درصد افزایش داد (Vaishnav and Choudhary, 2019). افزایش در محتوای کلروفیل کل (۱۸٪) در گیاهان آبیاری‌شده و تحت تنش آبی تلقیح‌شده با سودوموناس نسبت به گیاهان شاهد (بدون تلقیح با باکتری) در جو گزارش شد (Abideen et al., 2022). صاحب‌حسن و همکاران (۱۳۹۹) بیان کردند که کاربرد باکتری سودوموناس در ترکیب با میکوریز در شرایط تنش خشکی (۵۰ درصد ظرفیت زراعی) توانست محتوای کلروفیل کل را در گل همیشه‌بهار افزایش دهد. تلقیح با باکتری *Pseudomonas fluorescens* PF-135 منجر به افزایش محتوای کلروفیل کل گیاه بادرنجبویه در شرایط تنش خشکی شد (Mohammadi et al., 2021). افزایش محتوای کلروفیل کل در گیاهان تلقیح‌شده با باکتری سودوموناس آنروژینوزا سویه GGRJ21 تحت تنش خشکی در گیاه ماش گزارش شد (Sarma and Saikia, 2014).

محتوی کاروتنوئید برگ: نتایج محتوای کاروتنوئید برگ نشان داد که این صفت به‌طور معنی‌داری تنها تحت تأثیر اثر متقابل تنش خشکی و باکتری قرار گرفت (جدول ۳). مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی و باکتری نشان داد که تغییر معنی‌داری در سطح تنش ۴۰ و ۶۵ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر بین شاهد (بدون باکتری) و سویه‌های T12، T13 و T17 باکتری سودوموناس در محتوای کاروتنوئید برگ مشاهده نشد. با افزایش تنش خشکی به ۹۰ میلی‌متر تبخیر از سطح تشتک تبخیر بین شرایط بدون کاربرد باکتری (شاهد) و کاربرد سویه‌های T12 و T13 تفاوت معنی‌داری در محتوای کاروتنوئید برگ مشاهده نشد اما با کاربرد سویه T17 کم‌ترین محتوای کاروتنوئید برگ مشاهده شد و سویه T12 و T13 مشاهده شد که تفاوت آن معنی‌دار بود (شکل ۳).

روند تغییرات کاروتنوئید به این صورت قابل توجیه است که بر اثر تنش خشکی، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان (شکل ۳) همراه با شدت گرفتن تنش خشکی ناشی از تأخیر در آبیاری، افزایش یافته و از اهمیت نقش محافظتی کاروتنوئیدها کاسته شده است (و به دلیل مشابه، در سطح شاهد باکتری که



شکل ۳- تغییرات محتوی کاروتنوئید (میلی گرم بر گرم وزن تر) برگ سیب زمینی تحت تأثیر باکتری سودوموناس در هر سطح تنش خشکی. تیمارهای دارای حروف مشترک براساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد با هم تفاوت معنی دار ندارند.

بوته‌های سیب زمینی در سال دوم آزمایش با تعداد روزهای آفتابی بیشتر و همچنین دمای محیط نسبتاً گرم‌تری در مقایسه با سال اول آزمایش مواجه بودند (شکل ۱ و جدول ۲)، لذا از فعالیت فتوسنتزی (به خصوص در مراکز واکنش نوری II برگ‌ها) بیشتری برخوردار بودند که این امر نیز سبب افزایش تولید رادیکال‌های آزاد (ناشی از تولید و انتقال الکترون در زنجیره انتقال الکترون) می‌گردد و در نتیجه، مکانیسم‌های خنثی‌سازی این عوامل در گیاه بیشتر فعالیت می‌کند. نتایج مقایسه میانگین در سال اول آزمایش نشان داد در تیمار شاهد آبیاری (۴۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر) با کاربرد باکتری سویه T17 بیش‌ترین فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز مشاهده شد. با افزایش خشکی به ۶۵ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر بیش‌ترین فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در سویه T13 و کم‌ترین میزان این صفت با کاربرد سویه T12 بدست آمد. در تیمار تنش شدید خشکی (۹۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر) بیش‌ترین فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در سویه T13 و T17 باکتری و کم‌ترین میزان این صفت با کاربرد سویه T12 و تیمار بدون مصرف باکتری بدست آمد. در سال دوم آزمایش در تیمار ۴۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر بیش‌ترین فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در تیمار سویه T12 و کم‌ترین میزان این صفت با کاربرد سویه T17 باکتری بدست آمد. بیش‌ترین فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در تیمار سویه باکتری T13 و کم‌ترین میزان این صفت با کاربرد باکتری

فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان کمتر است، میزان کاروتنوئید بیشتری در برگ‌ها وجود دارد). همچنین شکل ۳ نشان می‌دهد در تیمار خشکی شدید، که باکتری سویه T17 تأثیر قابل توجه و بیشتری (حتی نسبت به سایر سویه‌ها) بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مورد مطالعه گذاشته و افت قابل توجه کاروتنوئیدها را به همراه داشته است. از طرف دیگر، به دلیل کاهش ظرفیت فتوسنتزی گیاه بر اثر تنش خشکی و عدم نیاز به دریافت انرژی نوری بیشتر توسط رنگدانه‌های کمکی، روند کاهش کاروتنوئیدها بر اثر تنش خشکی مشاهده می‌شود. با انجام پژوهشی در شرایط تنش خشکی (آبیاری پس از ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد تخلیه رطوبتی خاک) بر روی گیاه سرخارگل گزارش گردید که بیش‌ترین میزان کاروتنوئید برگ با کاربرد باکتری سودوموناس به‌تنهایی و همچنین در تلفیق با کود فسفر نسبت به شاهد مشاهده شد زیرا مصرف باکتری سودوموناس از طریق بهبود جذب عناصر غذایی تا حدودی سبب افزایش محتوی کاروتنوئید برگ شده است (عطارزاده و همکاران، ۱۳۹۸).

فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز برگ: نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که این صفت به‌طور معنی داری تحت تأثیر سال، خشکی، اثر متقابل سال در خشکی، باکتری، سال در باکتری، خشکی در باکتری و برهمکنش اثر سه‌گانه سال در خشکی در باکتری قرار گرفت (جدول ۵). از آنجایی که نمونه‌برداری برای صفات فیزیولوژیک کمی قبل از شروع غده‌بندی صورت گرفته و در این مدت هم

جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس مرکب آنزیم سوپراکسید دیسموتاز، آنزیم پراکسیداز و آنزیم کاتالاز برگ سیب‌زمینی در طی دو سال آزمایش

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات		
		سوپراکسید دیسموتاز	پراکسیداز	کاتالاز
سال (Y)	۱	۴۵۵۸۸۵/۱۷ **	۰/۰۰۳۰۳۱**	۰/۰۵۸۴۱۳۶ **
سال × تکرار	۴	۲۸۸/۸۱	۰/۰۰۰۰۱۹	۰/۰۰۰۰۰۱
خشکی (D)	۲	۵۰۰۰۵/۱۴ **	۰/۰۰۰۰۱۱۱ ns	۰/۰۰۰۱۰۶۰ **
خشکی × سال	۳	۲۰۴۱۹/۲۶ **	۰/۰۰۰۰۵۱ **	۰/۰۰۰۰۷۷۷ **
خطای a	۲	۸۰/۲۴	۰/۰۰۰۰۰۸	۰/۰۰۰۰۰۱۹
سودوموناس (P)	۳	۷۵۵۳/۴۳ **	۰/۰۰۰۰۰۱۸ ns	۰/۰۰۴۷۸۱ **
Y×P	۲	۷۴۸۸/۵۴ **	۰/۰۰۰۰۰۴۳ **	۰/۰۰۴۲۸۰ **
D×P	۶	۵۳۳۵/۰۲ **	۰/۰۰۰۰۰۵۲ ns	۰/۰۰۱۳۷۵ **
Y×D×P	۶	۳۰۵۱/۵۰ **	۰/۰۰۰۰۰۴۴ **	۰/۰۰۱۵۰۲ **
خطای b	۳	۱۵۷/۲۹	۰/۰۰۰۰۰۰۷	۰/۰۰۰۰۰۲۳ **
ضریب تغییرات	-	۷/۸۹	۳۰	۱۵/۶۳

ns, * و **: به ترتیب عدم وجود اختلاف معنی‌دار، معنی‌دار در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد

محیطی است زیرا آنها نقش حیاتی در حذف گونه‌های فعال اکسیژن دارند (Singh et al., 2020). افزایش قابل توجهی در فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در گیاهان تلقیح‌شده با سویه‌های باکتری سودوموناس در شرایط تنش خشکی در مقایسه با شاهد تیمارنشده در گیاهان ارزن انگشتی گزارش گردید (Chandra et al., 2020). با کاربرد باکتری‌های سودوموناس و باسیلوس فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در گیاهان نعنای فلفلی تلقیح‌شده در شرایط تنش خشکی نسبت به گیاهان تلقیح‌نشده افزایش معنی‌داری نشان داد (Chiappero et al., 2019).

فعالیت آنزیم پراکسیداز برگ: اثرات سال، سال در خشکی، سال در باکتری، برهمکنش سال در باکتری در خشکی بر فعالیت آنزیم پراکسیداز برگ معنی‌دار بود (جدول ۵). در سال اول آزمایش در تیمار شاهد آبیاری (۴۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر) با توجه به اینکه بین سویه‌های متفاوت باکتری سودوموناس تفاوت معنی‌داری در فعالیت آنزیم پراکسیداز برگ مشاهده نشد اما کم‌ترین میزان این صفت در تیمار بدون

سویه T17 در سطح آبیاری ۶۵ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر مشاهده شد. با افزایش تنش خشکی به ۹۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر بین سویه‌های متفاوت باکتری و تیمار بدون باکتری تفاوت معنی‌داری وجود داشت به طوری‌که بیش‌ترین فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در سویه باکتری T13 و کم‌ترین فعالیت آنزیم در تیمار بدون باکتری مشاهده شد (جدول ۶).

برای خنثی‌کردن اثر گونه‌های فعال اکسیژن، در گیاهان سیستم‌های دفاعی آنتی‌اکسیدانی مانند آنزیم سوپراکسید یسموتاز (SOD) وجود دارند که منجر به سم‌زدایی ROS می‌شود. تلقیح با ریزوباکتری‌های محرک رشد مانند سودوموناس در گندم فعالیت آنزیم‌های SOD، CAT و POD را تحت تنش خشکی افزایش داد (Valizadeh-rad et al., 2022). گزارش شده است با تلقیح برنج با ریزوباکتری‌های محرک رشد (سودوموناس و تریکودرما) در شرایط تنش خشکی فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز (SOD) افزایش یافت. SOD اولین خط دفاعی گیاهان در برابر تنش‌های

جدول ۶- تغییرات آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز، پراکسیداز و کاتالاز (واحد آنزیم بر میلی گرم پروتئین محلول برگ) برگ سیب زمینی در اثر تلقیح سویه‌های مختلف باکتری در هر سطح آبیاری در طی دو سال آزمایش

کاتالاز		پراکسیداز		سوپراکسیداز دیسموتاز		سویه‌های باکتری	سطح آبیاری
سال اول	سال دوم	سال اول	سال دوم	سال اول	سال دوم		
۰/۰۰۶۰ i	۰/۰۰۰۴ e	۰/۰۰۲۲ cd	۰/۰۰۰۲ d	۱۴۷/۳۳ i	۶۷/۸۰ fg	بدون باکتری	
۰/۰۱۳۱ hi	۰/۰۰۰۶ e	۰/۰۰۱۴ de	۰/۰۱۸۴ ab	۲۱۶ g	۶۴ gh	T12	۴۰ میلی متر تبخیر
۰/۰۵۶۷ e	۰/۰۰۱۹ cde	۰/۰۰۱۲ e	۰/۰۱۳۵ c	۱۹۵ h	۵۲/۲۰ hi	T13	از تشتک تبخیر
۰/۱۱۳۷ b	۰/۰۰۱۲ e	۰/۰۰۲۸ bc	۰/۰۱۶۳ a-c	۱۳۲ j	۷۸/۲۰ c-f	T17	
۰/۰۱۸۰ h	۰/۰۰۰۸ e	۰/۰۰۲۹ bc	۰/۰۱۵۰ bc	۲۳۳ f	۶۳/۷۰ ghi	بدون باکتری	
۰/۰۶۳۰ e	۰/۰۰۴۰ bcd	۰/۰۰۲۶ b	۰/۰۱۳۲ c	۲۲۷ fg	۵۰/۷۰ j	T12	۶۵ میلی متر تبخیر
۰/۰۶۷۲ d	۰/۰۰۴۳ bc	۰/۰۰۲۵ b-d	۰/۰۲۰۶ a	۳۰۶ c	۱۰۲/۲۰ b	T13	از تشتک تبخیر
۰/۰۸۴۴ c	۰/۰۰۲۵ b-e	۰/۰۰۳۶ b	۰/۰۱۳۷ c	۱۲۵/۳۳ j	۸۱/۸۰ cde	T17	
۰/۰۳۲۶ g	۰/۰۰۰۵ e	۰/۰۰۵۳ a	۰/۰۲۰۸ a	۲۶۴ e	۸۶/۶۰ c	بدون باکتری	
۰/۰۱۲۱۱ a	۰/۰۰۱۱ e	۰/۰۰۳۶ b	۰/۰۱۶۷ a-c	۲۸۷ d	۸۴/۸۷ cd	T12	۹۰ میلی متر تبخیر
۰/۰۴۴۲ f	۰/۰۰۵۴ a	۰/۰۰۱۷ cd	۰/۰۱۹۱ ab	۳۷۵ a	۱۰۴/۵۳ ab	T13	از تشتک تبخیر
۰/۰۸۹۹ c	۰/۰۰۴۹ b	۰/۰۰۲۷ bc	۰/۰۲۰۶ a	۳۵۳ b	۱۱۴/۳۳ a	T17	

در هر ستون تیمارهای دارای حروف مشترک بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد با هم تفاوت معنی دار ندارند.

کاربرد باکتری سودوموناس فعالیت آنزیم پراکسیداز برگ را کاهش داد به طوری که کمترین میزان این صفت با کاربرد سویه T13 مشاهده شد و تفاوت معنی داری با سویه T17 باکتری سودوموناس نشان نداد (جدول ۶). آسیب اکسیداتیو در گیاهانی که تحت تنش‌های محیطی مختلف رشد می‌کنند را می‌توان از طریق میکروارگانیسم‌ها کاهش داد و گیاهان را قادر ساخت تا با شرایط خشکی مقابله کنند. در میان آن‌ها، ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه (Plant Growth Promoting Rhizobacteria) مسئول کاهش اثر تنش خشکی در محیط‌های خشک هستند (Seleiman et al., 2021). با انجام پژوهشی در شرایط تنش خشکی بر روی ارقام متفاوت باقلا گزارش گردید که فعالیت آنزیم پراکسیداز به طور قابل توجهی با افزایش سطوح تنش آبی در همه ارقام افزایش یافت. با این حال، فعالیت این آنزیم به طور قابل توجهی در گیاهان تلقیح شده با باکتری سودوموناس سویه putida و باکتری ریزوبیوم سویه leguminosarum در شرایط خشکی در مقایسه با گیاهان غیر

باکتری بدست آمد. در تیمار ۶۵ میلی متر تبخیر از تشتک تبخیر بین سویه‌های T12 و T17 باکتری سودوموناس و تیمار بدون باکتری تفاوت معنی داری در فعالیت آنزیم پراکسیداز برگ به دست نیامد و تنها کاربرد سویه T13 باکتری سودوموناس فعالیت آنزیم پراکسیداز برگ را افزایش معنی داری داد. با افزایش تنش خشکی به ۹۰ میلی متر تبخیر از تشتک تبخیر بین سویه‌های متفاوت باکتری و تیمار بدون باکتری تفاوت معنی داری در فعالیت آنزیم پراکسیداز برگ مشاهده نشد. در سال دوم آزمایش در سطح آبیاری ۴۰ میلی متر تبخیر از تشتک تبخیر (شاهد) بیشترین فعالیت آنزیم پراکسیداز برگ در تیمار باکتری سودوموناس سویه T17 مشاهده شد که تفاوت معنی داری با تیمار بدون کاربرد باکتری نشان نداد. با افزایش خشکی به ۶۵ میلی متر تبخیر از تشتک تبخیر بین تیمارهای متفاوت باکتری و بدون باکتری تفاوت معنی داری مشاهده نشد. با ۹۰ میلی متر تبخیر از تشتک تبخیر بیشترین فعالیت آنزیم پراکسیداز برگ در تیمار بدون کاربرد باکتری بدست آمد و

تلقیح‌شده افزایش معنی‌داری نشان داد (Mansour *et al.*, 2022). در پژوهشی بر روی برنج در شرایط تنش خشکی گزارش شد که در رقم *Sahbhagi* (مقاوم به تنش خشکی) با کاربرد باکتری سودوموناس فلورسنس سویه P2 فعالیت آنزیم پراکسیداز به‌طور معنی‌داری افزایش یافت و در رقم IR-64 (حساس به تنش خشکی) افزایش فعالیت این آنزیم با کاربرد سویه‌های P₂, *Jessenii* R62 و *Synxantha* R81 باکتری سودوموناس مشاهده شد (Gusain *et al.*, 2015). افزایش فعالیت آنزیم پراکسیداز در گیاهان ماش تلقیح‌شده با باکتری سودوموناس سویه aeruginosa GGRJ21 در شرایط تنش خشکی گزارش شد (Sarma and Saikia, 2014).

فعالیت آنزیم کاتالاز برگ: نتایج تجزیه واریانس فعالیت آنزیم کاتالاز برگ نشان داد که این صفت تحت تأثیر سال، خشکی، اثر متقابل سال در خشکی، باکتری، سال در باکتری، خشکی در باکتری و برهمکنش اثر سه‌گانه سال در خشکی در باکتری قرار گرفت (جدول ۵). نتایج مقایسه میانگین فعالیت آنزیم کاتالاز برگ در سال اول آزمایش نشان داد که در تیمار شاهد آبیاری (۴۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر) اختلاف معنی‌داری بین سویه‌های باکتری و تیمار بدون باکتری مشاهده نشد. در تیمار ۶۵ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کم‌ترین فعالیت آنزیم کاتالاز برگ در تیمار بدون کاربرد باکتری بدست آمد و استفاده از سویه‌های باکتری فعالیت این آنزیم را افزایش داد. با افزایش خشکی به ۹۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر بیش‌ترین فعالیت آنزیم کاتالاز برگ در تیمار کاربرد سویه T13 و کمترین میزان این صفت در تیمار T12 و تیمار بدون کاربرد باکتری سودوموناس مشاهده شد. در سال دوم آزمایش در تیمار آبیاری شاهد (۴۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر) با استفاده از سویه T17 باکتری سودوموناس بیش‌ترین فعالیت آنزیم کاتالاز برگ مشاهده شد و کمترین میزان این صفت در تیمار بدون باکتری و استفاده از سویه T12 باکتری بدست آمد. با افزایش تنش خشکی به ۶۵ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کم‌ترین فعالیت آنزیم کاتالاز در تیمار بدون مصرف باکتری و بیش‌ترین فعالیت این آنزیم با کاربرد سویه T17 باکتری

سودوموناس به دست آمد. در تیمار تنش خشکی شدید (۹۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر) با مصرف سویه T12 باکتری سودوموناس بیش‌ترین فعالیت این آنزیم به دست آمد و کم‌ترین میزان این صفت در تیمار بدون مصرف باکتری مشاهده شد (جدول ۶). افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان به منظور ممانعت از تنش اکسیداتیو و حذف گونه‌های فعال اکسیژن از مؤثرترین راهکارهای استفاده شده توسط گیاه برای مقاومت در مقابل تنش خشکی است (قنبری و همکاران، ۱۳۹۹). فعالیت و تجمع آنتی‌اکسیدان‌ها در پاسخ به شرایط کمبود آب با تلقیح ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه گزارش شده است و موجب کاهش و مقاومت بیشتر گیاهان به تنش خشکی می‌شود (Kour and Yadav, 2022). شواهد زیادی وجود دارد که نشان داده است که PGPR فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی چندین گیاه از جمله کینوا، گوجه‌فرنگی و صنوبر را در شرایط رشد نرمال و تحت تنش‌های زیستی و غیرزیستی افزایش داده است (Mekureyaw *et al.*, 2022). افزایش قابل‌توجه فعالیت آنزیم کاتالاز (CAT) در بامیه پیش‌تیمار شده با سودوموناس تحت تنش خشکی نشان‌دهنده مشارکت فعال آن‌ها در تبدیل H₂O₂ به آب است. گیاه ریحان تحت تنش خشکی تلقیح‌شده با *Bacillus sp.*, *Pseudomonas sp.* و *Azospirillum brasilense* به‌طور قابل‌توجهی فعالیت آنزیم کاتالاز را بهبود بخشیدند. ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه باعث افزایش تنظیم آنزیم‌های کاهش‌دهنده تنش‌های محیطی مانند SOD، CAT، POX و APX می‌شود که به کاهش سطح ROS در ارقام برنج و سیب‌زمینی تحت تنش خشکی کمک می‌کند (Pravisyta *et al.*, 2019). در پژوهشی استفاده از باکتری سودوموناس سویه GAP-P45 putida تحت شرایط تنش خشکی در ذرت، به‌طور قابل‌توجهی فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی CAT، APX و گلوکاتایون پراکسیدازها را در مقایسه با گیاهان شاهد تلقیح‌نشده تحت تنش آبی کاهش داد (Ghosh *et al.*, 2018). تلقیح گوجه‌فرنگی با ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه از جمله سودوموناس منجر به افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز نسبت به گیاهان شاهد (بدون تلقیح) در شرایط

خشک اندام هوایی در تیمار ۴۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر (شاهد) و کم‌ترین میزان این صفت در تیمار ۹۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر مشاهده شد (شکل ۵). تنش خشکی به عنوان یکی از محدودکننده‌ترین عوامل در رشد و عملکرد در تولید محصولات کشاورزی در نظر گرفته می‌شود. تحت تنش خشکی، پتانسیل‌های آبی در ناحیه ریشه منفی می‌شوند و در نتیجه دسترسی به آب کاهش می‌یابد که بر رشد و نمو گیاه تأثیر می‌گذارد (Garcia-Caparrós et al., 2019). وزن تر و خشک زیست‌توده اندام هوایی گندم زمستانه تحت تنش خشکی متوسط (۴۰-۵۰ درصد ظرفیت مزرعه) و شدید (۳۰-۴۰ درصد ظرفیت مزرعه) به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافت، زیرا کاهش فتوسنتز ناشی از کمبود آب بر رشد برگ‌ها تأثیر گذاشته است که قادر به گسترش کامل نبودند. تشعشعات مؤثر فتوسنتزی دریافت‌شده توسط گندم زمستانه کاهش یافته و در نتیجه ارتفاع گیاه و تجمع مواد کاهش یافت که منجر به کاهش زیست‌توده شد (Zhao, et al., 2020). کاهش تولید زیست‌توده اندام هوایی در اثر تنش خشکی در مقایسه با آبیاری شاهد در گوجه‌فرنگی و کاهو گزارش گردید (Ruiz-Lozano et al., 2016).

وزن خشک غده: نتایج تجزیه واریانس حاکی از آن است که تنها اثر سال و باکتری بر وزن خشک غده معنی‌دار بود. سایر تیمارها بر این صفت اثر معنی‌دار نداشتند (جدول ۷). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیش‌ترین وزن خشک غده با کاربرد سویه‌های T12 و T13 باکتری سودوموناس و کم‌ترین میزان این صفت در تیمار بدون باکتری (شاهد) مشاهده شد (شکل ۶). یکی از بهترین ویژگی‌های ارزیابی چگونگی سیب‌زمینی فرآوری‌شده برای ساخت خوارک‌های گوناگون و همچنین تازه‌خوری، درصد ماده خشک غده آن است. با کاربرد کودهای زیستی (*Pseudarthrobacter oxydans*, *Ensifer Brevundimonas Acinetobacter pittii morelensis Pseudomonas Enterobacter ludwigii vesicularis Pseudomonas Paenibacillus lautus frederiksbergensis Enterobacter mori*, *Enterobacter tabaci helmanticensis*

تنش خشکی شد که با نتایج آزمایش ما مطابقت داشت به‌طوری‌که در تنش خشکی ۶۵ و ۹۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر بیش‌ترین فعالیت آنزیم کاتالاز برگ با کاربرد سویه‌های T12 و T17 نسبت به شاهد بدون باکتری در هر دو سال آزمایش به دست آمد (Bindu et al., 2018).

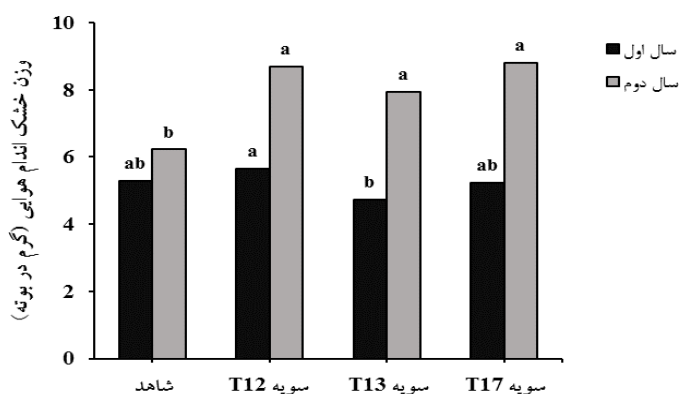
وزن خشک اندام هوایی: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که وزن خشک اندام هوایی تحت‌تأثیر سال، خشکی و برهمکنش سال در باکتری قرار گرفت. سایر بر این صفت اثر معنی‌دار نداشتند (جدول ۷). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که در سال اول آزمایش بیش‌ترین وزن خشک اندام هوایی به‌ترتیب با کاربرد باکتری سودوموناس سویه T12 مشاهده شد که تفاوت معنی‌داری با شاهد و سویه T17 نداشت و کم‌ترین میزان این صفت با کاربرد سویه و T13 باکتری سودوموناس مشاهده شد اما تفاوت معنی‌داری با شاهد و سویه T17 نداشت. در سال دوم آزمایش کم‌ترین وزن خشک اندام هوایی در تیمار شاهد (بدون باکتری) مشاهده شد و کاربرد سویه‌های باکتری سودوموناس منجر به افزایش معنی‌دار این صفت نسبت به تیمار بدون باکتری شد اما بین سویه‌های مختلف باکتری تفاوت معنی‌داری دیده نشد (شکل ۴). استفاده از کود زیستی برای ارتقای رشد گیاه و حفاظت از سلامت گیاه جز جدایی‌ناپذیر تولید محصول پایدار است. اثر بخشی تلقیح‌های باکتریایی بر تولید محصول به فرآیندهای پیچیده برهمکنش‌های گیاه و باکتری و عوامل محیطی بستگی دارد (Ansari and Ahmad, 2019). تلقیح گیاهان با ریزوباکترهای محرک رشد گیاه یک جایگزین پایدار برای کاهش استفاده بیش از حد از کودهای شیمیایی در کشاورزی است (Perez-Rodriguez et al., 2020). با انجام پژوهشی افزایش وزن خشک اندام هوایی و ریشه گوجه‌فرنگی، خیار، کاهو و سیب‌زمینی در نتیجه تلقیح با باکتری‌های سودوموناس گزارش شد (Ahrwar et al., 2015).

نتایج مقایسه میانگین سطوح مختلف تنش خشکی در هر دو سال آزمایش نشان داد که با افزایش تنش خشکی وزن خشک اندام هوایی کاهش یافت به‌طوری‌که بیش‌ترین وزن

جدول ۷- نتایج تجزیه واریانس مرکب وزن خشک اندام هوایی، وزن خشک غده، وزن غده و تعداد غده در بوته سیب‌زمینی در طی دو سال آزمایش

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات		
		وزن خشک اندام هوایی	وزن خشک غده	متوسط وزن غده
سال (Y)	۱	۱۳۱/۰۲**	۱۵/۶۴*	۲۶۲۵۸/۶۸**
سال × تکرار	۴	۲/۵۲ ns	۱/۸۷ ns	۲۷۳/۴۷ ns
خشکی (D)	۲	۴۳/۹۶**	۵۳/۴۴ ns	۵۶۶۹۵/۴۳**
خشکی × سال	۳	۰/۱۳ ns	۵/۳۲ ns	۳۱۵۹/۳۴**
خطای a	۲	۱/۹۱	۴/۳۹	۶۷۰/۲۴
سودوموناس (P)	۳	۷/۶۷ ns	۴۰/۶۸*	۳۰۳۳۴/۱۶**
Y×P	۲	۶/۳۶**	۳/۹۵ ns	۴۳۰۲/۳۸**
D×P	۶	۰/۷۳۷ ns	۰/۷۲ ns	۶۶۰۸/۱۸**
Y×D×P	۶	۰/۸۵۰ ns	۳/۹۳ ns	۳۳۳۵/۷۷**
خطای b	۳	۱/۱۶	۳/۰۰۱	۹۰۵/۴۶
ضریب تغییرات	-	۱۶/۴۲	۸/۹۷	۹/۷۵
		۱۱/۲۱		

ns، * و **: به ترتیب عدم وجود اختلاف معنی‌دار، معنی‌دار در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد

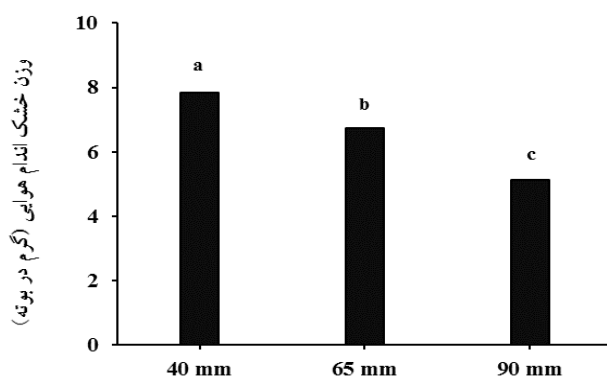


شکل ۴- تغییرات وزن خشک اندام هوایی (گرم در بوته) سیب‌زمینی تحت تأثیر سویه‌های باکتری سودوموناس. در هر سال، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک براساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

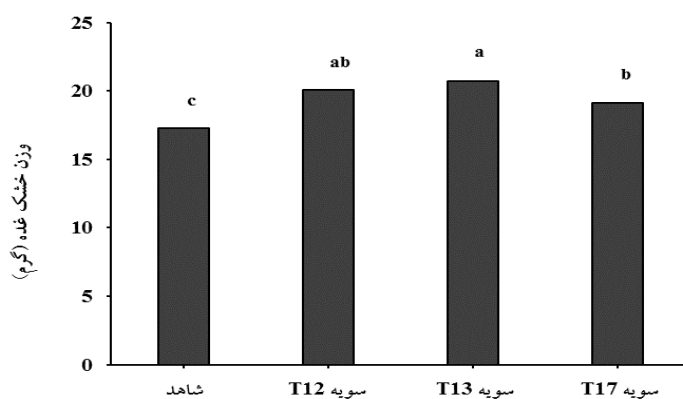
نیترژن، فسفر و پتاسیم است که پیامد افزایش سطح ریشه در تیمارهای تلقیح‌شده است (نعیم و اطرشی، ۱۳۹۳). تیمار با باکتری سودوموناس وزن خشک غده را در دو رقم ساوالان (Savalan) و آگریا (Agria) سیب‌زمینی افزایش داد (قاضی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۰).

متوسط وزن غده: نتایج متوسط وزن غده در بوته نشان داد که این صفت به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر سال، خشکی،

در کشت سیب‌زمینی افزایش درصد ماده خشک در رقم سائنه (۱۷-۲۱ گرم) و رقم فونتانه (۱۸-۲۱ گرم) گزارش شده است (قنبری و صفری سنجانی، ۱۴۰۰). در بررسی تأثیر باکتری‌ها و قارچ‌های محرک رشد گیاه بر افزایش عملکرد و برخی از پارامترهای رشدی سه رقم سیب‌زمینی گزارش شد که افزایش وزن خشک مینی‌تیوبرها در تیمارهای تلقیح‌شده با باکتری و قارچ در مقایسه با تیمار شاهد احتمالاً به علت افزایش جذب



شکل ۵- تغییرات وزن خشک اندام هوایی (گرم در بوته) سیب‌زمینی تحت تأثیر سطوح مختلف تنش خشکی. میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک براساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.



شکل ۶- تغییرات وزن خشک غده (گرم) سیب‌زمینی تحت تأثیر سویه‌های باکتری سودوموناس. میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک براساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

بدون مصرف باکتری به دست آمد. در سال دوم آزمایش استفاده از سویه T12 باکتری سودوموناس در سطح شاهد آبیاری (۴۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر) وزن کل غده را افزایش معنی‌داری نسبت به تیمار بدون باکتری و سویه‌های T17 و T13 داد. در سطح خشکی ۶۵ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کم‌ترین وزن کل غده در تیمار بدون مصرف باکتری (شاهد) مشاهده شد و با توجه به اینکه استفاده از سویه‌های متفاوت باکتری سودوموناس وزن غده را نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری داد اما بین سویه‌های مختلف باکتری تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. با افزایش خشکی به ۹۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر بیش‌ترین وزن کل غده در تیمار T13 و T17 باکتری سودوموناس و کم‌ترین میزان این صفت در تیمار

برهمکنش سال در خشکی، باکتری، برهمکنش سال در باکتری، برهمکنش خشکی در باکتری و اثر سه گانه سال، خشکی و باکتری قرار گرفت (جدول ۷). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها در سال اول آزمایش نشان داد در تیمار شاهد آبیاری (۴۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر) بیش‌ترین وزن غده در بوته با کاربرد سویه T12 باکتری سودوموناس مشاهده شد. با افزایش خشکی به ۶۵ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر بیش‌ترین میزان این صفت با کاربرد سویه T13 و کم‌ترین وزن کل غده در بوته در تیمارهای بدون باکتری مشاهده شد. در سطح خشکی ۹۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر با کاربرد باکتری سودوموناس سویه T12 بیش‌ترین وزن کل غده در بوته مشاهده شد و از طرف دیگر کم‌ترین میزان این صفت در تیمار

جدول ۸- تغییرات متوسط وزن غده (گرم در بوته) و تعداد غده در بوته سیب‌زمینی در اثر تلقیح سویه‌های مختلف باکتری در هر سطح آبیاری در طی دو سال آزمایش

تعداد غده در بوته		وزن غده		سویه‌های باکتری	سطح آبیاری
سال اول	سال دوم	سال اول	سال دوم		
۵/۱۳ ^b	۳/۴۷ ^{f-i}	۲۵۵/۳۳ ^{ghi}	۳۶۰ ^{bc}	بدون باکتری	
۵/۹۰ ^a	۳/۶۰ ^{c-g}	۴۴۶ ^a	۴۳۶ ^a	T12	۴۰ میلی‌متر تبخیر
۴/۱۰ ^{gh}	۵/۰۷ ^a	۳۴۸ ^b	۳۵۱ ^{bcd}	T13	از تشتک تبخیر
۴/۸۷ ^{bc}	۵/۲۰ ^a	۳۳۴ ^{bc}	۳۶۱ ^b	T17	
۴/۸۳ ^{b-e}	۳/۱۳ ^{ghi}	۲۲۲/۶۷ ^{ij}	۲۵۸ ⁱ	بدون باکتری	
۴/۳۳ ^{efg}	۴/۰۷ ^{bc}	۲۹۳/۳۳ ^{c-g}	۲۹۷/۳۳ ^{gh}	T12	۶۵ میلی‌متر تبخیر
۴/۸۰ ^{b-f}	۴/۲۰ ^b	۳۱۶ ^{b-e}	۳۴۶/۶۷ ^{b-e}	T13	از تشتک تبخیر
۴/۸۷ ^{bcd}	۴/۰۷ ^{bcd}	۳۱۹/۳۳ ^{bcd}	۳۲۷/۶۷ ^f	T17	
۲/۴۰ ^k	۲/۴۷ ^j	۱۴۸ ^k	۲۴۵/۳۳ ⁱ	بدون باکتری	
۴/۰۷ ^{ghi}	۴/۰۷ ^{b-e}	۲۰۷ ^j	۳۴۸/۳۳ ^{b-e}	T12	۹۰ میلی‌متر تبخیر
۳/۸۰ ^{hij}	۳/۶۰ ^{c-h}	۳۰۸ ^{b-f}	۳۱۴ ^{fg}	T13	از تشتک تبخیر
۴/۰۷ ^{ghi}	۳/۹۳ ^{b-f}	۲۷۳/۳۳ ^{e-h}	۲۸۴ ^h	T17	

در هر ستون تیمارهای دارای حروف مشترک بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد با هم تفاوت معنی‌دار ندارند.

این صفت به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر سال، خشکی، برهمکنش سال در خشکی، باکتری، برهمکنش سال در باکتری و اثر سه گانه سال، خشکی و باکتری قرار گرفت (جدول ۷). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها در سال اول آزمایش نشان داد که در سطح آبیاری شاهد (۴۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر) بیش‌ترین تعداد غده در بوته با کاربرد سویه T13 و T17 نسبت به تیمار بدون کاربرد باکتری و کاربرد سویه T12 به دست آمد. در تنش خشکی ۶۵ و ۹۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کم‌ترین تعداد غده در بوته در تیمار شاهد (بدون باکتری) مشاهده شد و با کاربرد سویه‌های باکتری میزان این صفت افزایش یافت. در سال دوم آزمایش در سطح آبیاری شاهد (۴۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر) بیش‌ترین و کم‌ترین تعداد غده در بوته به ترتیب با کاربرد سویه T12 و T13 باکتری مشاهده شد. در تنش خشکی ملایم (۶۵ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر) تفاوت معنی‌داری در تعداد کل غده در بوته در تیمار بدون مصرف باکتری (شاهد) و سویه‌های متفاوت باکتری

بدون مصرف باکتری (شاهد) مشاهده شد (جدول ۸). تنش کمبود آب به عنوان یک عامل محیطی اصلی در نظر گرفته می‌شود که بسیاری از فرآیندهای متابولیک را مهار می‌کند و در نهایت رشد و بهره‌وری محصول را محدود می‌کند اما ریزوباکترهای محرک رشد گیاه (PGPR) مانند سودوموناس می‌توانند رشد گیاه را در شرایط تنش آبی حمایت کنند (Zarei *et al.*, 2019). گزارش شده است که کودهای زیستی سودوموناس، ازتوباکتر و آزوسپریلیوم به ترتیب افزایش ۴/۸، ۶/۲ و ۵/۸ درصدی را در متوسط وزن غده‌های سیب‌زمینی نشان دادند و این افزایش را ناشی از افزایش جذب مواد غذایی و فتوسنتز بوته‌های سیب‌زمینی می‌دانند (داداش‌زاده و فرج‌زاده معماری تبریزی، ۱۳۹۹). کاربرد باکتری سودوموناس سویه *Achromobacter xylosoxidans* Cm4 و *oryzihabitans* Ep4 باعث افزایش وزن غده دو رقم Swift و Nevsky سیب‌زمینی در شرایط کمبود آب شد (Belimov *et al.*, 2015).
تعداد غده در بوته: نتایج تعداد غده در بوته نشان داد که

رشد و نمو گیاه و عملکرد غده در مترمربع می‌گردند (قاضی‌زاده و همکاران، ۱۴۰۱).

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که در سال اول و دوم آزمایش با کاربرد سویه‌های متفاوت باکتری سودوموناس محتوای کلروفیل b، کلروفیل a+b و کاروتنوئید در شرایط تنش خشکی افزایش یافتند به طوری که بیش‌ترین میزان این صفات با کاربرد سویه T17 باکتری در تنش خشکی ۹۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر مشاهده شد. کاربرد سویه T12 نسبت به سویه T17 و T13 و بدون کاربرد باکتری وزن خشک اندام هوایی و وزن خشک غده را در شرایط شاهد و تنش خشکی افزایش داد. افزایش تعداد غده در بوته با کاربرد سویه‌های باکتری نسبت به تیمار بدون باکتری مشاهده شد. استفاده از سویه‌های T12 و T13 وزن غده در بوته را افزایش معنی‌داری داد. استفاده از سویه‌های T17 و T13 فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز و T12 و T17 فعالیت آنزیم کاتالاز را در شرایط شاهد و تنش خشکی در هر دو سال آزمایش افزایش دادند. در فعالیت آنزیم پراکسیداز با اینکه افزایش معنی‌داری با کاربرد باکتری سودوموناس مشاهده شد اما تفاوت معنی‌داری بین سویه‌های مختلف باکتری سودوموناس در شرایط تنش خشکی مشاهده نشد. با توجه به اینکه تنش خشکی باعث محدود شدن رشد گیاه و بهره‌وری سیب‌زمینی به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌شود، تلقیح گیاهان با ریزوباکترهای محرک رشد گیاه در شرایط تنش خشکی می‌تواند برای افزایش رشد و عملکرد سیب‌زمینی مؤثر باشد.

سودوموناس مشاهده نشد. با افزایش خشکی به ۹۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کم‌ترین تعداد کل غده در بوته در تیمار بدون مصرف باکتری (شاهد) مشاهده شد و استفاده از سویه‌های باکتری تعداد غده را افزایش داد (جدول ۸). کمبود آب به‌طور قابل‌توجهی عملکرد بسیاری از محصولات از جمله سیب‌زمینی را کاهش می‌دهد و یک رویکرد امیدوارکننده برای کاهش اثرات منفی خشکی بر محصولات، استفاده از همزیستی بین گیاهان و میکروارگانیسم‌های مفید است (Belimov et al., 2015). باکتری‌های محرک رشد گیاهی از طریق بهبود شرایط تغذیه‌ای و افزایش جذب مواد معدنی موجب افزایش تعداد غده در بوته می‌شوند. این باکتری‌های موجب افزایش رشد گیاه به‌طور مستقیم از طریق کمک به دستیابی به منابع نیتروژن، فسفر و مواد معدنی ضروری یا تعدیل هورمون گیاهی یا از طریق غیرمستقیم با کاهش اثرات مهاری پاتوژن‌های مختلف بر رشد و توسعه گیاه می‌شود (پناهیان کیوی و همکاران، ۱۳۹۹). افزایش تعداد غده در بوته سیب‌زمینی با کاربرد باکتری سودوموناس همراه با قارچ میکوریز آربسکولار در شرایط تنش خشکی گزارش شد (Sabra et al., 2021). با انجام پژوهشی به منظور بررسی فسفر و باکتری سودوموناس فلورسنس بر عملکرد سیب‌زمینی رقم آگریا گزارش گردید که کمترین میانگین تعداد غده در بوته در تیمار شاهد (بدون باکتری) و بالاترین میانگین تعداد غده در بوته از تیمار تلقیح‌شده با باکتری سودوموناس به دست آمد که نسبت به تیمار شاهد ۵/۱ درصد افزایش یافت (بهبود و همکاران، ۱۳۹۱). تلقیح غده‌های سیب‌زمینی با باکتری سودوموناس باعث افزایش ۱۲/۶۶ درصدی تعداد غده در مترمربع نسبت به عدم تلقیح با باکتری شد که احتمالاً باکتری‌های سودوموناس از طریق تبدیل فسفر نامحلول در خاک به شکل محلول و قابل جذب به واسطه فیتوهورمون‌ها و سیدروفورها، منجر به افزایش

منابع

اسکندری، علی، خزاعی، حمیدرضا، نظامی، احمد، و کافی، محمد (۱۳۹۰). مطالعه تأثیر رژیم آبیاری بر عملکرد و برخی از خصوصیات کیفی سه رقم سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.). نشریه آب و خاک، ۲۵(۲)، ۲۴۰-۲۴۷.

<https://doi.org/10.22067/JSW.V0I0.9299>

- الحوشان، محمد، زاهدی، مرتضی، رامین، علی‌اکبر، و سبزه‌علیان، محمدرضا (۱۳۹۸). تحمل و حساسیت فیزیولوژیکی به تنش کم آبی در ارقام سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.). *مجله فرایند و کارکرد گیاهی*، ۸(۳۲)، ۴۴۷-۴۶۲.
DOR:20.1001.1.23222727.1398.8.32.13.1
- بهبود، محمد، گلچین، احمد، و بشارتی، حسین (۱۳۹۱). تأثیر فسفر و باکتری‌های محرک رشد (PGPR) سودوموناس فلورسنس بر عملکرد و کیفیت گیاه سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.) رقم آگریا. *نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*، ۲۶(۲)، ۲۶۰-۲۷۱.
<https://doi.org/10.22067/JSW.V0I0.14149>
- پناهیان کیوی، مهدی، راعی، یعقوب، حسن‌پناه، داود، و حکم‌علی‌پور، سعید (۱۳۹۹). اثر باکتری‌های محرک رشد گیاهی بر رشد و عملکرد غده‌های بذری حاصل از کاشت مینی‌تیوبر سیب‌زمینی. *مجله علمی پژوهشی اکوفیزیولوژی گیاهی*، ۱۲(۴۰)، ۲۳۸-۲۲۵.
JR_JPEC-12-40_019
- خانی‌نژاد، سعید، خزاعی، حمیدرضا، نباتی، جعفر، و کافی، محمد (۱۳۹۵). تأثیر سه گونه قارچ میکوریز بر عملکرد و برخی خصوصیات فیزیولوژیک دو رقم سیب‌زمینی تحت تنش خشکی در شرایط کنترل‌شده. *نشریه پژوهش‌های زراعی ایران*، ۱۴(۴)، ۵۵۸-۵۷۴.
<https://doi.org/10.22067/GSC.V14I4.21993>
- داداش‌زاده، محمد، و فرج‌زاده معماری تبریزی، الناز (۱۳۹۹). اثر کاربرد باکتری‌های محرک رشد و اسیدهای آمینه بر عملکرد کمی و کیفی سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L. CV Agria). *تولیدات گیاهی*، ۴۳(۳)، ۴۰۸-۳۰۹.
<https://doi.org/10.22055/ppd.2019.28009.1696>
- صاحب‌حسن، مهدی، سلاح‌ورزی، یحیی، نباتی، جعفر، و عزیزی ارانی، مجید (۱۳۹۹). تأثیر تنش خشکی و کودهای زیستی بر برخی صفات مورفوفیزیولوژیک، بیوشیمیایی و رنگدانه‌های فتوسنتزی گل همیشه‌بهار. *مجله فرایند و کارکرد گیاهی*، ۹(۳۶)، ۱۳۵-۱۵۱.
DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.36.2.5
- عطارزاده، محمود، بلوچی، حمیدرضا، موحدی دهنوی، محسن، صالحی، امین، و رجایی، مجید (۱۳۹۸). اثر تلفیق کود فسفره، قارچ مایکوریزا آربسکولار و باکتری سودوموناس فلورسنس بر عملکرد کمی و کیفی سرخارگل (*Echinacea purpurea*) تحت رژیم‌های متفاوت آبیاری. *پایان‌نامه دکتری، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران*.
- قاضی‌زاده، سیده محدثه، عامریان، محمدرضا، اصغری، حمیدرضا، رحیمی، مهدی، و اسدی رحمانی، هادی (۱۳۹۰). تأثیر باکتری سودوموناس فلورسنس بر میزان فسفر خاک و برخی صفات مورفولوژیک دو رقم سیب‌زمینی در شرایط تنش کم آبیاری. *دوازدهمین کنگره علوم خاک ایران، تبریز، ایران*.
- قاضی‌زاده، سیده محدثه، عامریان، محمدرضا، اصغری، حمیدرضا، و اسدی رحمانی، هادی (۱۴۰۱). بررسی باکتری سودوموناس بر برخی صفات مورفوفیزیولوژیک دو رقم سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.) در فواصل مختلف آبیاری. *تنش‌های محیطی در علوم زراعی*، ۱۵(۴)، ۱۰۳۷-۱۰۵۷.
<https://doi.org/10.22077/escs.2021.4225.199>
- قنبری، احسان، فتحی‌زاده، امید، و طبری کوچکسرای، مسعود (۱۳۹۹). تأثیر قارچ میکوریز و ریزوباکتری محرک رشد بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نهال استبرق تحت تنش خشکی. *فصلنامه علمی پژوهش و توسعه جنگل*، ۶(۳)، ۴۸۹-۴۷۷.
<https://doi.org/10.30466/JFRD.2020.120866>
- قنبری، معصومه، و صفری سنجانی، علی‌اکبر (۱۴۰۰). پیامد ۱۰ جدایه باکتری گشاینده (حل‌کننده) پتاسیم، فسفر، آهن و کود زیستی پتاپارور بر کارکرد و رشد سیب‌زمینی در گلخانه. *نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار*، ۱۱(۴)، ۹۷-۷۷.
<https://doi.org/10.22069/EJSMS.2022.18870.2015>
- نعیم، امیرحسین، و اطروشی، محمود (۱۳۹۳). بررسی تأثیر باکتری‌ها و قارچ‌های محرک رشد گیاه بر افزایش عملکرد و برخی از پارامترهای رشدی سه رقم سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.). *نشریه تولید و فراوری محصولات زراعی و باغی*، ۴(۱۳)، ۴۸-

DOR: 20.1001.1.22518517.1393.4.13.4.2.۳۷

- Abideen, Z., Cardinale, M., Zulfiqar, F., Koyro, H. W., Rasool, S. G. H., Hessini, K., Darbali, W., Zhao, F., & Siddique, K. H. M. (2022). Seed endophyte bacteria enhance drought stress tolerance in *Hordeum vulgare* by regulating, physiological characteristics, antioxidants and minerals uptake. *Frontiers in Plant Science*, 13(2), 1-20. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.980046>
- Ahamad, L. & Siddiqui, Z. A. (2021). Effects of *Pseudomonas putida* and *Rhizophagus irregularis* alone and in combination on growth, chlorophyll, carotenoid content and disease complex of carrot. *Indian Phytopathology*, 74, 763-773. <https://doi.org/10.1007/s42360-021-00346-y>
- Ahirwar, N., Gupta, G., Singh, V., Rawley, R. K., & Ramana, R. (2015). Influence on growth and fruit yield of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) plants by inoculation with *Pseudomonas fluorescence* (SS5): Possible role of plant growth promotion. *International Journal Current Microbiology. Applied Sciences*, 4(2), 720-730. ISSN: 2319-7706
- Alvarez-Morezuelas, A., Barandalla, L., Ritter, E., Lacuesta, M., & de Galarreta, J. I. R. (2022). Physiological response and yield components under greenhouse drought stress conditions in potato. *Journal of Plant Physiology*, 278, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2022.153790>
- Ansari, F. A. & Ahmad, I. (2019). Fluorescent pseudomonas-FAP2 and *Bacillus licheniformis* interact positively in biofilm mode enhancing plant growth and photosynthetic attributes. *Scientific Reports*, 9(1), 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40864-4>
- Ansari, M. H., Rahmani, H. A., Ardakani, M. R., Paknejad, F., Habibi, D., & Mafakheri, S. (2012). Effect of *Pseudomonas fluorescens* on proline and phytohormonal status of maize (*Zea mays* L.) under water deficit stress. *Annals of Biological Research*, 3(2), 1054-1062. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4518.9280>
- Arnon, D. I. (1949). Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, 24(1), 1-15. <https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1>
- Banik, P., Zeng, W., Tai, H., Bizimungu, B., & Tanino, K. (2016). Effects of drought acclimation on drought stress resistance in potato (*Solanum tuberosum* L.) genotypes. *Environmental and Experimental Botany*, 126, 76-89. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2016.01.008>
- Beauchamp, C. & Fridovich, I. (1971). Superoxide dismutase: Improved assays and an assay applicable to acrylamide gels. *Analytical Biochemistry*, 44(1), 276-287. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(71\)90370-8](https://doi.org/10.1016/0003-2697(71)90370-8)
- Belimov, A. A., Dodd, I. C., Safronova, V. I., Shaposhnikov, A. I., Azarova, T. S., Makarova, N. M., Davies, W. J., & Tikhonovich, I. A. (2015). Rhizobacteria that produce auxins and contain 1-amino-cyclopropane-1-carboxylic acid deaminase decrease amino acid concentrations in the rhizosphere and improve growth and yield of well-watered and water-limited potato (*Solanum tuberosum*). *Annals of Applied Biology*, 167(1), 11-25. <https://doi.org/10.1111/aab.12203>
- Bindu, G. H., Selvakuma, G., Shivashankara, K. S., & Kumar, N. S. (2018). Osmotolerant plant growth promoting bacterial inoculation enhances the antioxidant enzyme levels of tomato plants under water stress conditions. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 7(1), 2824-2833. <https://doi.org/10.20546/ijcm.2018.701.337>
- Chance, B. & Maehly, A. (1955). Assay of catalases and peroxidases. *Methods in Enzymology*, 2, 764-775. [http://dx.doi.org/10.1016/S0076-6879\(55\)02300-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0076-6879(55)02300-8)
- Chandra, D., Srivastava, R., Glick, B. R., & Sharma, A. K. (2020). Rhizobacteria producing ACC deaminase mitigate water-stress response in finger millet (*Eleusine coracana* (L.) Gaertn). *Biotech*, 10(2), 1-15. <https://doi.org/10.1007/s13205-019-2046-4>
- Chandrasekaran, M. & Paramasivan, M. (2022). Arbuscular mycorrhizal fungi and antioxidant enzymes in ameliorating drought stress: A meta-analysis. *Plant and Soil*, 480(1), 295-9303. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05582-3>
- Chiappero, J., del Rosario Cappellari, L., Alderete, L. G. S., Palermo, T. B., & Banchio, E. (2019). Plant growth promoting rhizobacteria improve the antioxidant status in *Mentha piperita* grown under drought stress leading to an enhancement of plant growth and total phenolic content. *Industrial Crops and Products*, 139, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111553>
- Cho, S. M., Anderson, A. J., & Kim, C. H. (2018). Extracellular polymeric substances of *Pseudomonas chlororaphis* O6 induce systemic drought tolerance in plants. *Research in Plant Disease*, 24(3), 242-247. <https://doi.org/10.5423/RPD.2018.24.3.242>
- Dhindsa, R. S., Plumb-Dhindsa, P., & Thorpe, T. A. (1981). Leaf senescence: Correlated with increased levels of membrane permeability and lipid peroxidation, and decreased levels of superoxide dismutase and catalase. *Journal of Experimental Botany*, 32(1), 93-101. <https://doi.org/10.1093/jxb/32.1.93>
- Dongyu, Q. (2020). Role and potential of potato in global food security. *Food and Agriculture Organization*, 1-37.
- Farooq, M., Hussain, M., Wahid, A., & Siddique, K. (2012). Drought stress in plants: An overview. In: *Plant Responses to Drought Stress: from Morphological to Molecular Features* (ed. Aroca, R.) Pp. 1-33. Heidelberg Ganeshan, Berlin. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32653-0_1

- Fioreze, S. L., Pinheiro, M. G., Pereira, Y. D., & da Cruz, S. P. (2020). Inoculation of wheat plants with *Pseudomonas* spp. and *Azospirillum brasilense* under drought stress. *Journal of Experimental Agriculture International*, 42(2), 1-7. <https://doi.org/10.9734/jeai/2020/v42i230461>
- Garcia-Caparros, P., Romero, M. J., Llanderal, A., Cermeno, P., Lao, M. T., & Segura, M. L. (2019). Effects of drought stress on biomass, essential oil content, nutritional parameters, and costs of production in six Lamiaceae species. *Water*, 11(573), 1-12. <https://doi.org/10.3390/w11030573>
- Ghosh, D., Sen, S., & Mohapatra, S. (2018). Drought-mitigating *Pseudomonas putida* GAP-P45 modulates proline turnover and oxidative status in *Arabidopsis thaliana* under water stress. *Annals of Microbiology*, 68(9), 579-594. <https://doi.org/10.1007/s13213-018-1366-7>
- Gu, Y., Wang, J., Xia, Z., & Wei, H. L. (2020). Characterization of a versatile plant growth-promoting rhizobacterium *Pseudomonas mediterranea* strain S58. *Microorganisms*, 8(3), 1-15. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8030334>
- Gusain, Y. S., Singh, U. S., & Sharma, A. K. (2015). Bacterial mediated amelioration of drought stress in drought tolerant and susceptible cultivars of rice (*Oryza sativa* L.). *African Journal of Biotechnology*, 14(9), 764-773. <https://doi.org/10.5897/AJB2015.14405>
- Handayani, T. & Watanabe, K. (2020). The combination of drought and heat stress has a greater effect on potato plants than single stresses. *Plant, Soil and Environment*, 66(4), 175-182. <https://doi.org/10.17221/126/2020-PSE>
- Hill, D., Nelson, D., Hammond, J., & Bell, L. (2021). Morphophysiology of potato (*Solanum tuberosum*) in response to drought stress: Paving the way forward. *Frontiers in Plant Science*, 11, 1-19. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.597554>
- Ijaz, M., Shahzadi, R., Rahman, M. U., & Iqbal, M. (2019). Molecular approaches to study plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPRs). In: plant Growth-Promoting Rhizobacteria for Agricultural Sustainability (eds. Kumar, A. and Meena, V. S.) Pp. 215-232. Springer Nature Singapore Pte Ltd, Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-7553-8>
- Jaleel, C. A., Manivannan, P., Sankar, B., Kishorekumar, A., Gopi, R., Somasundaram, R., & Panneerselvam, R. (2007). *Pseudomonas fluorescens* enhances biomass yield and ajmalicine production in *Catharanthus roseus* under water deficit stress. *Colloids and Surfaces Biointerfaces*, 60(1), 7-11. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2007.05.012>
- Jamil, M., Ahamd, M., Anwar, F., Zahir, A., Kharal, M., & Nazli, F. (2018). Inducing drought tolerance in wheat through combined use of l-tryptophan and *Pseudomonas fluorescens*. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 55(2), 331-337. <https://doi.org/10.21162/PAKJAS/18.4980>
- Kacheyo, O. C., van Dijk, L. C. M., de Vries, M. E., & Struik, P. C. (2021). Augmented descriptions of growth and development stages of potato (*Solanum tuberosum* L.) grown from different types of planting material. *Annals of Applied Biology*, 178 (3), 549-566. <https://doi.org/10.1111/aab.12661>
- Kour, D. & Yadav, A. N. (2022). Bacterial mitigation of drought stress in plants: Current perspectives and future challenges. *Current Microbiology*, 79(9), 284-293. <https://doi.org/10.1007/s00284-022-02939-w>
- Mansour, E., Mahgoub, H. A., Mahgoub, S. A., El-Sobky, E. I. S., Abdul-Hamid, M. I., Kamara, M., Mahmud, K. K., & Khudhur, A. M. (2022). Effects of the transconjugant *Pseudomonas fluorescens* carrying 1-Aminocyclopropane-1-Carboxylate Deaminase gene on drought tolerance of wheat. *Natural Volatiles & Essential Oils*, 9(1), 1227-1242. ISSN: 2148-9637
- Mehrasa, H., Farnia, A., Jafarzadeh Kenarsari, M., & Nakhjavan, Sh. (2022). Endophytic bacteria and SA application improve growth, biochemical properties, and nutrient uptake in white beans under drought stress. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22, 3268-3279. <https://doi.org/10.1007/s42729-022-00884-y>
- Mekureyaw, M. F., Beierholm, A. E., Nybroe, O., & Roitsch, T. G. (2022). Inoculation of tomato (*Solanum lycopersicum*) roots with growth promoting *Pseudomonas* strains induces distinct local and systemic metabolic biosignatures. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 117, 1-10 <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2021.101757>
- Mohammadi, H., Saeedi, S., Hazrati, S., & Brestic, M. (2021). Physiological and phytochemical responses of lemon balm (*Melissa officinalis* L.) to pluramin application and inoculation with *Pseudomonas fluorescens* PF-135 under water-deficit stress. *Russian Journal of Plant Physiology*, 68(5), 909-922. <https://doi.org/10.1134/s1021443721050125>
- Moon, K. B., Ahn, D. J., Park, J. I. S., Jung, W. Y., Cho, H. S., Kim, H. R., Jeon, J. H., Park, Y. I., & Kim, H. S. (2018). Transcriptome profiling and characterization of drought-tolerant potato plant (*Solanum tuberosum* L.). *Molecules and Cells*, 41(11), 979-992. <https://doi.org/10.14348/molcells.2018.0312>
- Nahar, K., Hasanuzzaman, M., & Fujita, M. (2016). Roles of osmolytes in plant adaptation to drought and salinity. In: Osmolytes and Plants Acclimation to Changing Environment: Emerging Omics Technologies (eds. Iqbal, N., Nazar, R. and Khan, N. A.) Pp. 37-68. New Delhi Heidelberg New York Dordrecht, London. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2616-1_4
- Ojuederie, O. B., Olanrewaju, O. S., & Babalola, O. O. (2019). Plant growth promoting rhizobacterial mitigation of drought stress in crop plants: Implications for sustainable agriculture. *Agronomy*, 9(11), 1-29.

- <https://doi.org/10.3390/agronomy9110712>
- Pal, A., Acharya, K., Vats, S., Kumar, S., & Ahuja, P. S. (2013). Over-expression of PaSOD in transgenic potato enhances photosynthetic performance under drought. *Biologia Plantarum*, 57(2), 359-364. <https://doi.org/10.1007/s10535-012-0277-x>
- Perez-Rodriguez, M. M., Pontin, M., Lipinski, V., Bottini, R., Piccoli, P., & Cohen, A. C. (2020). *Pseudomonas fluorescens* and *Azospirillum brasilense* increase yield and fruit quality of tomato under field conditions. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20(9), 1-11. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00233-x>
- Pravisya, P., Jayaram, K. M., & Yusuf, A. (2019). Biotic priming with *Pseudomonas fluorescens* induce drought stress tolerance in *Abelmoschus esculentus* (L.) Moench (Okra). *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 25(1), 101-112. <https://doi.org/10.1007/s12298-018-0621-5>
- Rahimzadeh, S. & Pirzad, A. (2017). Arbuscular mycorrhizal fungi and *Pseudomonas* in reduce drought stress damage in flax (*Linum usitatissimum* L.): A field study. *Mycorrhiza*, 27(6), 537-552. <https://doi.org/10.1007/s00572-017-0775-y>
- Ramirez, D., Rolando, J., Yactayo, W., Monneveux, P., Mares, V., & Quiroz, R. (2015). Improving potato drought tolerance through the induction of long-term water stress memory. *Plant Science*, 238(2) 26-32. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2015.05.016>
- Ruiz-Lozano, J. M., Aroca, R., Zamarreno, A. M., Molina, S., Andreo-Jimenez, B., Porcel, R., Garcia-Mina, J. M., Ruyter-Spira, C., & Lopez-Raez, J. A. (2016). Arbuscular mycorrhizal symbiosis induces strigolactone biosynthesis under drought and improves drought tolerance in lettuce and tomato. *Plant, Cell and Environment*, 39(2), 441-452. <https://doi.org/10.1111/pce.12631>
- Sabeti, M., Tahmasebi, P., Ghehsareh Ardestani, E., & Nikookhah, F. (2019). Effect of plant growth promoting Rhizobacteria (PGPR) on the seed germination, seedling growth and photosynthetic pigments of *Astragalus caragana* under drought stress. *Journal of Rangeland Science*, 9(4), 364-377. <https://doi.org/10.1007/s12298-019-0621-5>
- Sabra, M. A., Hussein, M. E., Aboul-Nasr, A. M., & El-Habbab, A. A. (2021). Profiteering of bio and organic fertilizers on potato production under drought exertion. *Egyptian Academic Journal of Biological Sciences*, 13(2), 91-109. <https://doi.org/10.21608/eajbsg.2021.217317>
- Saglam, A., Demiralay, M., Colak, D. N., Gedik, N. P., Basok, O., & Kadioglu, A. (2022). *Pseudomonas putida* KT2440 induces drought tolerance during fruit ripening in tomato. *Bioagro*, 34(2), 139-150. <http://www.doi.org/10.51372/bioagro342.4>
- Sarma, R. K. & Saikia, R. (2014). Alleviation of drought stress in mung bean by strain *Pseudomonas aeruginosa* GGRJ21. *Plant and Soil*, 377(2), 111-126. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1981-9>
- Seleiman, M. F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., Dindaroglu, T., Abdul-Wajid, H. H., & Battaglia, M. L. (2021). Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. *Plants*, 10(2), 1-25. <https://doi.org/10.3390/plants10020259>
- Sen, S. & Mohapatra, S. (2022). Drought-mitigating *Pseudomonas putida* strain modulates polyamine catabolism in *Arabidopsis thaliana*. *Journal of Plant Growth Regulation*, 41, 300-313. <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10297-3>
- Shemi, R., Wang, R., Gheith, E. L. S., Hussain, H. A., Hussain, S., Irfan, M., Cholidah, L., Zhang, K., Zhang, S., & Wang, L. (2021). Effects of salicylic acid, zinc and glycine betaine on morpho-physiological growth and yield of maize under drought stress. *Scientific Reports*, 11(1), 1-14. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82264-7>
- Singh, D. P., Singh, V., Gupta, V. K., Shukla, R., Prabha, R., Sarma, B. K., & Patel, J. S. (2020). Microbial inoculation in rice regulates antioxidative reactions and defense related genes to mitigate drought stress. *Scientific Reports*, 10(1), 1-17. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61140-w>
- Vaishnav, A. & Choudhary, D. K. (2019). Regulation of drought-responsive gene expression in *Glycine max* L. Merrill is mediated through *Pseudomonas simiae* strain AU. *Journal of Plant Growth Regulation*, 38(3), 1-10. <https://doi.org/10.1007/s00344-018-9846-3>
- Valizadeh-rad, K., Motesarezadeh, B., Alikhani, H. A., Jalali, M., Etesami, H., & Javadzarin, I. (2022). Morphophysiological and nutritional responses of canola and wheat to water deficit stress by the application of plant growth-promoting bacteria, nano-silicon, and silicon. *Journal of Plant Growth Regulation*, 42(21), 1-17. <https://doi.org/10.1007/s00344-022-10824-w>
- Zarei, T., Moradi, A., Kazemeini, S. A., Farajee, H., & Yadavi, A. (2019). Improving sweet corn (*Zea mays* L. var Saccharata) growth and yield using *Pseudomonas fluorescens* inoculation under varied watering regimes. *Agricultural Water Management*, 226, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105757>
- Zhao, W., Liu, L., Shen, Q., Yang, J., Han, X., Tian, F., & Wu, J. (2020). Effects of water stress on photosynthesis, yield, and water use efficiency in winter wheat. *Water*, 12(8), 1-19. <https://doi.org/10.3390/w12082127>

Effect of different strains of *Pseudomonas* bacteria on physiological traits and yield components of potato (*Solanum tuberosum* L.) under drought stress conditions

Mina Rafiei¹, Asghar Rahimi^{1*}, Arman Azari¹, Seyed Rasoul Sahhafi¹, Ahmad Aein²,
Pezhman Khodaygan³

¹ Department of Genetics and Plant Production, College of Agriculture, Vali-e- Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran

² Kerman Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Jiroft, Iran

³ Department of Plant Protection, College of Agriculture, Vali-e- Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran

(Received: 2023/07/26, Accepted: 2023/11/20)

Abstract

In order to investigate the effects of different *Pseudomonas* bacterial strains, including fluorescens, Chloraphis and Putida strains, on the morpho-physiological characteristics and performance of Sante variety potato under drought stress in the Jiroft region, an experimental study was conducted in the form of a split-plot design with a randomized complete block design with three replications for two years, 2019–2020 and 2020–2021. The main factor of the experiment consisted of three levels of drought stress (40, 65, and 90 mm of evaporation from the evaporation class A pan), while the sub-factor included four levels of *Pseudomonas* bacterial strains (control, strain T12 (*Pseudomonas fluorescens* RO7), strain T13 (*Pseudomonas putida* RO3) and strain T17 (*Pseudomonas chlororaphis* RO1). The results showed that the applied drought stress treatments had no effect on the chlorophyll a content. The use of *Pseudomonas* bacteria strains increased the content of chlorophyll b and total chlorophyll (a+b). The carotenoid content of leaves at 90 evaporation from the Class A pan with the application of bacteria strain T17 showed the lowest amount compared to the treatment without bacteria and strains T12 and T13. Application of bacteria strain T13 showed the highest superoxide dismutase (SOD) enzyme activity at different drought stress levels. There was no significant difference in peroxidase enzyme activity between different *Pseudomonas* bacterial strains and the treatment without bacterial application at various drought stress levels. The highest catalase enzyme activity in the leaves was observed in the application of *Pseudomonas* bacterial strains T12 and T17. The application of *Pseudomonas* bacterial strains led to a significant increase in shoot dry weight, tuber dry weight, and total tuber weight in potato plants compared to the treatment without bacterial application at all drought stress levels.

Keywords: Antioxidant enzymes, Drought stress, Dry weight, *Pseudomonas*, Tuber yield

Corresponding author, Email: rahimiasg@gmail.com