فرآیند و کارکرد گیاهی، جلد ۱۳، شماره ۶۰، خرداد و تیرماه ۱۴۰۳ صفحه: ۲۶۵-۲۸۷
https://doi.org/10.22034/13.60.265

مقاله پژوهشی

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 ولی‌عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران

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

[۳] گروه گیاه‌پزشکی دانشگاه ولی‌عصر (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 سانته 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 *Pseudomonas putida* RO3 T13 و سویه *Pseudomonas chlororaphis* RO1 T17) 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 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 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

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

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-14]

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-Caparros *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 قابل‌توجه 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 – گلوتاتیون 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 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، به‌طوری‌که 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 به‌طور 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

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-14]

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 (Ahamad 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.

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی تأثیر سویه‌های مختلف باکتری سودوموناس گونه‌های فلورسنس، کلرافیس و پوتیدا بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت، محتوای رنگدانه‌های برگی و صفات مرتبط با عملکرد گیاه سیب‌زمینی رقم سانته 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 دآمیناز در آنها مشاهده شده بود. سویه‌های مذکور دارای شناسنامه دقیق فنوتیپی بوده و قبلاً براساس توالی‌یابی 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 سیب‌زمینی‌کار دو ردیفه اجرا شد. فاصله پشته‌ها از هم ۱۰۰ سانتی‌متر بود که در هر

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-14]

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)، به‌منظور 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 برگی (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 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 ۱۳۹۸-۱۳۹۹ و ۱۳۹۹-۱۴۰۰ در جدول ۲ آورده شده است.

برای اندازه‌گیری میزان کلروفیل a، b و کاروتنوئیدها، از نمونه‌های برگی انتخاب‌شده (مرحله اوایل پرشدن غده) به‌صورت 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 طول‌موج‌های ۴۸۰، ۵۱۰، ۶۴۵، ۶۵۲ و ۶۶۳ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر خوانده و با استفاده از فرمول‌های زیر، اعداد برحسب میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر برگ به‌دست آمد (Arnon, 1949).

$$\text{Chl a (mg/g FW)} = 12.7\,(D_{663}) - 2.69\,(D_{645})\ V/1000\times W$$
$$\text{Chl b (mg/g FW)} = 22.9\,(D_{645}) - 4.68\,(D_{663})\ V/1000\times W$$
$$\text{Chl a+b (mg/g FW)} = (D652) - 1000/34.5\times V/1000\times W$$
$$\text{Car (mg/g FW)} = 7.6\,(D470) - 1.49\,(D\ 510)\ V/1000\times W$$

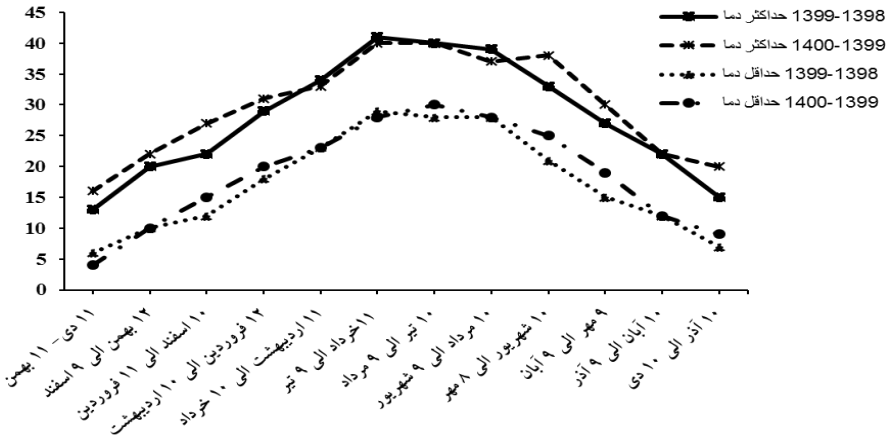
D: میزان جذب نور، V: حجم نهایی عصاره، W: وزن تر نمونه (گرم)

برای اندازه‌گیری آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، ابتدا عصاره گیاهی تهیه شد. برای عصاره‌گیری از نمونه‌های برگی 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 هموژنیزه 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 ریبوفلاوین صورت گرفت. در این روش ۵۰ میکرولیتر از عصاره استخراج با یک میلی‌لیتر محلول اندازه‌گیری سوپراکسید دیسموتاز

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-14]

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و شیمیایی اصلی خاک مورد استفاده

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



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	۱۱ دی–۱۱ فروردین	۱۲ فروردین– ۹ تیر	۱۰ تیر–۸ مهر	۹ مهر–۱۰ دی	۱۱ دی–۱۱ فروردین	۱۲ فروردین– ۹ تیر	۱۰ تیر–۸ مهر	۹ مهر–۱۰ دی
	۱۳۹۸–۱۳۹۹				۱۳۹۹–۱۴۰۰			
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

شامل ۵۰ میلی‌مول بافر فسفات پتاسیم (pH =۷/۸)، نیتروبلوتترازولیوم ۷۵ میکرومولار، ال‌متیونین ۱۳ میلی‌مولار، EDTA ۰/۱ میلی‌مولار و ریبوفلاوین 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 طول‌موج 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 شد. در این روش ۳ میلی‌لیتر مخلوط واکنش حاوی ۲/۷۷ میلی‌لیتر بافر پتاسیم فسفات ۵۰ میلی‌مولار (pH =۷)، 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 طول‌موج 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

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-14]

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 طول‌موج ۲۴۰ نانومتر به مدت سه دقیقه خوانده شد.

تجزیه واریانس مرکب پس از آزمون همگن‌بودن 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 تحت‌تأثیر 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 به‌طور 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 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 تحت‌تأثیر 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 سانته (۴۳٪/۲) و کم‌ترین میزان این صفت در رقم ساتینا (۶/۸ ٪) مشاهده شد.

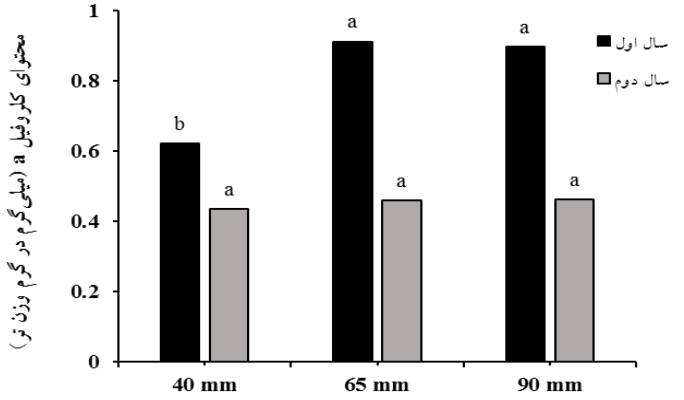
محتوی کلروفیل b برگ: تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که کلروفیل b تنها تحت‌تأثیر سال، برهمکنش خشکی در سال و برهمکنش خشکی، سال و باکتری قرار گرفت (جدول ۳). با توجه به شکل ۱ و جدول ۲، مشخص می‌شود که در زمان نمونه‌برداری برای صفات فیزیولوژیک (کمی قبل از شروع غده‌بندی) تعداد روزهای آفتابی و همچنین دمای محیط 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 دورهای آبیاری متفاوت، متغییر بود به‌طوری‌که 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

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-14]

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	کاروتنوئید
سال (Y)	۱	۲/۳۱۶ **	۲۹/۶۲۷**	۱۵/۳۷۵ **	۰/۰۱۴ ns
سال × تکرار	۴	۰/۰۵۴	۰/۰۱۴	۰/۰۷۸	۰/۰۱۰
خشکی (D)	۲	۰/۱۹۲ ns	۰/۴۲۹ ns	۰/۴۰۱ ns	۰/۰۲۹ ns
خشکی × سال	۳	۰/۱۳۴ **	۰/۶۳۶ **	۱/۲۳۵ **	۰/۰۱۰ ns
خطای a	۲	۰/۰۰۶	۰/۰۹۹	۰/۰۴۱	۰/۰۰۳
سودوموناس (P)	۳	۰/۰۰۵ ns	۰/۰۱۳ ns	۰/۰۱۰ ns	۰/۰۳۹ ns
Y×P	۲	۰/۰۳۲ ns	۰/۰۹۷ ns	۰/۰۹۸ ns	۰/۰۱۰ ns
D×P	۶	۰/۰۱۵ ns	۰/۲۶۳ ns	۰/۳۲۳ ns	۰/۰۴۳ *
Y×D×P	۶	۰/۰۲۷ ns	۰/۴۶۵**	۰/۳۸۳ **	۰/۰۰۹
خطای b	۳	۰/۰۱۵۴	۰/۰۳۶	۰/۱۱۶	۰/۰۱۰
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 محتوی 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 تشتک تبخیر (تنش شدید) بیش‌ترین محتوای کلروفیل b به ترتیب با کاربرد سویه T12 و T17 و کم‌ترین میزان این صفت در تیمار بدون باکتری و کاربرد سویه T13 مشاهده شد. بیشترین محتوای کلروفیل b در سال دوم آزمایش در تیمار شاهد (۴۰ میلی‌متر تبخیر از سطح تشتک تبخیر) در تیمار بدون باکتری مشاهده شد که با سویه T17 تفاوت معنی‌داری نشان نداد و کم‌ترین محتوای کلروفیل b با کاربرد سویه T13 بدست آمد. با افزایش تنش خشکی به ۶۵ میلی‌متر تبخیر از سطح تشتک تبخیر با کاربرد سویه T13 محتوای کلروفیل b افزایش یافت و کم‌ترین میزان این صفت با کاربرد سویه T17 باکتری مشاهده شد که تفاوت معنی‌داری با سویه T12 نداشت. در تنش شدید (۹۰ میلی‌متر

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-14]

جدول ۴- تغییرات محتوی کلروفیل b، محتوی کلروفیل a+b برگ (میلی‌گرم بر گرم وزن تر) سیب‌زمینی در اثر تلقیح سویه‌های مختلف باکتری سودوموناس در هر سطح آبیاری در طی دو سال آزمایش

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

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

تبخیر از سطح تشتک تبخیر) با وجود اینکه بین تیمارهای بدون باکتری و کاربرد سویه‌های مختلف باکتری تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد اما با کاربرد باکتری سویه T12 محتوای کلروفیل بیش‌تری نسبت به تیمار بدون باکتری مشاهده شد (جدول ۴). محتوای کلروفیل به عنوان شاخص تنش گیاه شناخته می‌شود. در شرایط تنش خشکی، فعالیت رادیکال‌های آزاد اکسیژن افزایش یافته که با پراکسیداسیون و تجزیه کلروفیل باعث آسیب به ساختمان کلروپلاست و فتوسیستم نوری کلروفیل می‌گردد (Mehrasa, *et al.*, 2022). کاهش رنگدانه‌های فتوسنتزی تحت سطوح بالای تنش خشکی به دلیل افزایش فعالیت رادیکال‌های آزاد در شرایط تنش است که به نوبه خود میزان رنگدانه‌های فتوسنتزی را تحت تنش خشکی کاهش می‌دهد (Sabeti *et al.*, 2019). تلقیح با باکتری سودوموناس در شرایط تنش خشکی می‌تواند منجر به افزایش فعالیت فتوسنتزی به دلیل بهبود تعادل هورمونی و کاهش تولید اتیلن شود، بنابراین از تجزیه پروتئین‌های کلروفیل جلوگیری می‌شود. ترشحات باکتری در ناحیه ریشه باعث تحریک تولید محافظ‌های اسمزی مختلف می‌شود که منجر به بهبود تنظیم آب می‌شود (Jamil *et al.*, 2018). گزارش شده است که با کاربرد سویه‌های 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 سلول‌های پارانشیم مزوفیل برگ‌ها 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 داده‌های محتوای کلروفیل کل نشان داد که این صفت به طور معنی‌داری تحت‌تأثیر 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

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-14]

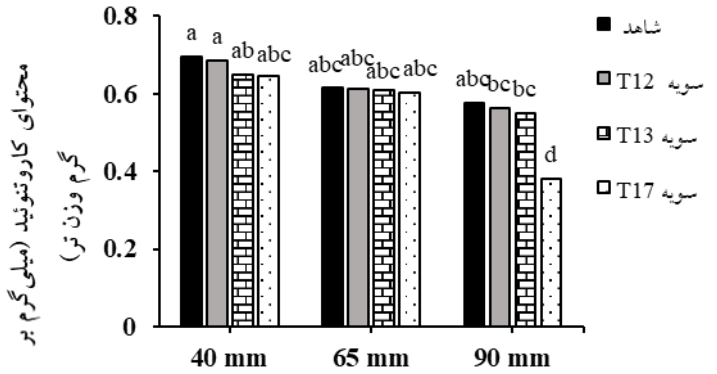
که در تیمار شاهد (۴۰ میلی‌متر تبخیر از سطح تشتک تبخیر) استفاده از سویه‌های مختلف باکتری سودوموناس محتوای کلروفیل a+b را نسبت به تیمار بدون باکتری افزایش معنی‌داری داد. در آبیاری ۶۵ میلی‌متر تبخیر از سطح تشتک تبخیر با وجود اینکه بین تیمار بدون باکتری و سویه‌های T12 و T13 تفاوت معنی‌داری در میزان این صفت 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 روزنه‌ای 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 آئروژینوزا 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 نسبت به شاهد و سویه T12 و T13 مشاهده شد که تفاوت آن معنی‌دار بود (شکل ۳).

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

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-14]



شکل۳- تغییرات محتوی کاروتنوئید (میلی‌گرم بر گرم وزن تر) برگ سیب‌زمینی تحت تأثیر باکتری سودوموناس در هر سطح تنش خشکی. تیمارهای دارای حروف مشترک براساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد با هم تفاوت معنی‌دار ندارند.

فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان کمتر است، میزان کارتنوئید بیشتری در برگ‌ها وجود دارد). همچنین شکل ۳ نشان می‌دهد در تیمار خشکی شدید، که باکتری سویه T17 تأثیر قابل‌توجه و بیشتری (حتی نسبت به سایر سویه‌ها) بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مورد مطالعه گذاشته و افت قابل‌توجه کارتنوئیدها 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 کاهشی کارتنوئیدها 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 محتوای 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 معنی‌داری تحت‌تأثیر 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 بوته‌های سیب‌زمینی 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

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-14]

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 **	۰/۰۰۰۱۱۱ ns	۰/۰۰۱۰۶۰ **
خشکی × سال	۳	۲۰۴۱۹/۲۶ **	۰/۰۰۰۰۵۱ **	۰/۰۰۰۷۷۷ **
خطای a	۲	۸۰/۲۴	۰/۰۰۰۰۰۸	۰/۰۰۰۰۱۹
سودوموناس (P)	۳	۷۵۵۳/۴۳ **	۰/۰۰۰۰۱۸ ns	۰/۰۰۴۷۸۱ **
Y×P	۲	۷۴۸۸/۵۴ **	۰/۰۰۰۰۴۳ **	۰/۰۰۴۲۸۰**
D×P	۶	۵۳۳۵/۰۲ **	۰/۰۰۰۰۵۲ ns	۰/۰۰۱۳۷۵ **
Y×D×P	۶	۳۰۵۱/۵۰ **	۰/۰۰۰۰۴۴ **	۰/۰۰۱۵۰۲ **
خطای b	۳	۱۵۷/۲۹	۰/۰۰۰۰۰۷	۰/۰۰۰۰۲۳ **
ضریب تغییرات	-	۷/۸۹	۳۰	۱۵/۶۳

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

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 به‌طوری‌که 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 محیطی است زیرا آنها نقش حیاتی در حذف گونه‌های فعال اکسیژن دارند (Singh *et al.*, 2020). افزایش قابل‌توجهی 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 نعناع 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

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-14]

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

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

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

باکتری بدست آمد. در تیمار ۶۵ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر بین سویه‌های T12 و T17 باکتری سودوموناس و تیمار بدون باکتری تفاوت معنی‌داری در فعالیت آنزیم پراکسیداز برگ به دست نیامد و تنها کاربرد سویه T13 باکتری سودوموناس فعالیت آنزیم پراکسیداز برگ را افزایش معنی‌داری داد. با افزایش تنش خشکی به ۹۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر بین سویه‌های متفاوت باکتری و تیمار بدون باکتری تفاوت معنی‌داری در فعالیت آنزیم پراکسیداز برگ مشاهده نشد. در سال دوم آزمایش در سطح آبیاری ۴۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر (شاهد) بیش‌ترین فعالیت آنزیم پراکسیداز برگ در تیمار باکتری سودوموناس سویه T17 مشاهده شد که تفاوت معنی‌داری با تیمار بدون کاربرد باکتری نشان نداد. با افزایش خشکی به ۶۵ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر بین تیمارهای متفاوت باکتری و بدون باکتری تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. با ۹۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر بیش‌ترین فعالیت آنزیم پراکسیداز برگ در تیمار بدون کاربرد باکتری بدست آمد و کاربرد باکتری سودوموناس فعالیت آنزیم پراکسیداز برگ را کاهش داد به‌طوری‌که کم‌ترین میزان این صفت با کاربرد سویه T13 مشاهده شد و تفاوت معنی‌داری 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 به‌طور قابل‌توجهی با افزایش سطوح تنش آبی در همه ارقام افزایش یافت. با این حال، فعالیت این آنزیم به‌طور قابل‌توجهی در گیاهان تلقیح‌شده با باکتری سودوموناس سویه putida و باکتری ریزوبیوم سویه leguminosarum در شرایط خشکی در مقایسه با گیاهان غیر

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-14]

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 P_2 فعالیت آنزیم پراکسیداز به‌طور معنی‌داری افزایش یافت و در رقم IR-64 (حساس به تنش خشکی) افزایش فعالیت این آنزیم با کاربرد سویه‌های P_2، 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 تحت‌تأثیر 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 پیش‌تیمارشده با سودوموناس تحت تنش خشکی نشان‌دهنده مشارکت فعال آن‌ها در تبدیل H_2O_2 به آب است. گیاه ریحان تحت تنش خشکی تلقیح‌شده با *Pseudomonas* sp.، *Bacillus* sp. و *Azospirullum 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 (Pravisya *et al.*, 2019). در پژوهشی استفاده از باکتری سودوموناس سویه putida GAP-P45 تحت شرایط تنش خشکی در ذرت، به‌طور قابل‌توجهی فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی CAT، APX و گلوتاتیون 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

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-14]

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 نسب 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 (Ahirwar *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 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-Caparros *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).

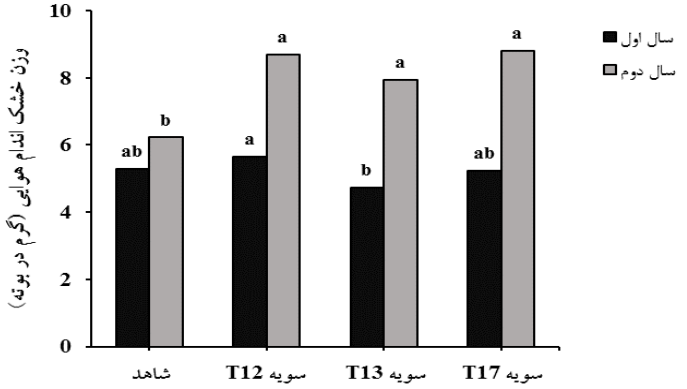
وزن خشک غده: نتایج تجزیه واریانس حاکی از آن است که تنها اثر سال و باکتری بر وزن خشک غده معنی‌دار بود. سایر تیمارها بر این صفت اثر معنی‌دار نداشتند (جدول ۷). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیش‌ترین وزن خشک غده با کاربرد سویه‌های T12 و T13 باکتری سودوموناس و کم‌ترین میزان این صفت در تیمار بدون باکتری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

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-14]

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	تعداد غده در بوته
سال (Y)	۱	۱۳۱/۰۲ **	۱۵/۶۴ *	۲۶۲۵۸/۶۸ **	۹۶۱/۴**
سال × تکرار	۴	۲/۵۲ ns	۱/۸۷ ns	۲۷۳/۴۷ ns	۰/۵۱ ns
خشکی (D)	۲	۴۳/۹۶ **	۵۳/۴۴ ns	۵۶۶۹۵/۴۳ **	۲۳/۰۷ **
خشکی × سال	۳	۰/۱۳ ns	۵/۳۲ ns	۳۱۵۹/۳۴ **	۰/۹۵**
خطای a	۲	۱/۹۱	۴/۳۹	۶۷۰/۲۴	۰/۱۹
سودوموناس (P)	۳	۷/۶۷ ns	۴۰/۶۸*	۳۰۳۳۴/۱۶ **	۹۳/۲**
Y×P	۲	۶/۳۶ **	۳/۹۵ ns	۴۳۰۲/۳۸ **	۱/۳۸**
D×P	۶	۰/۷۳۷ ns	۰/۷۲ ns	۶۶۰۸/۱۸ **	۰/۸۷**
Y×D×P	۶	۰/۸۵۰ ns	۳/۹۳ ns	۳۳۳۵/۷۷ **	۱/۱۹**
خطای b	۳	۱/۱۶	۳/۰۰۱	۹۰۵/۴۶	۰/۲۱
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

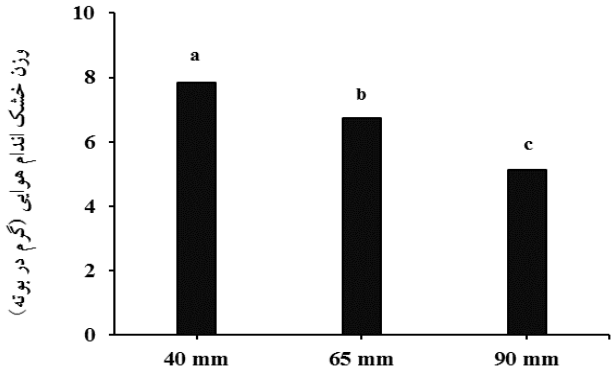


شکل ۴- تغییرات وزن خشک اندام هوایی (گرم در بوته) سیب‌زمینی تحت تأثیر سویه‌های باکتری سودوموناس. در هر سال، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک براساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

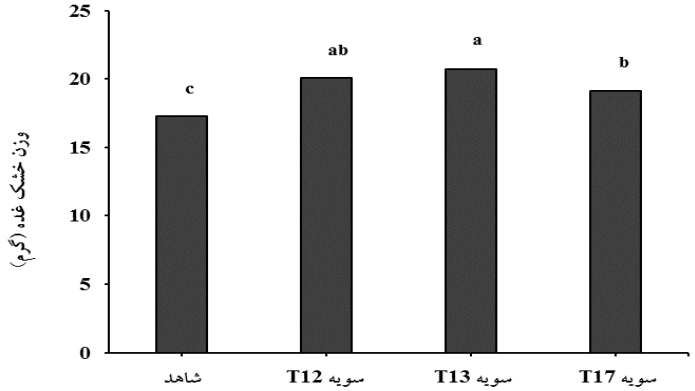
در کشت سیب‌زمینی افزایش درصد ماده خشک در رقم سانته (۲۱-۱۷ گرم) و رقم فونتانه (۱۸-۲۱ گرم) گزارش شده است (قنبری و صفری سنجانی، ۱۴۰۰). در بررسی تأثیر باکتری‌ها و قارچ‌های محرک رشد گیاه بر افزایش عملکرد و برخی از پارامترهای رشدی سه رقم سیب‌زمینی گزارش شد که افزایش وزن خشک مینی‌تیوبرها در تیمارهای تلقیح‌شده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

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-14]



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.

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 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

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-14]

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 دوسال آزمایش

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

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

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 این صفت به‌طور معنی‌داری تحت‌تأثیر 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

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-14]

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 مایکوریز 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 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 به‌طوری‌که 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 محدودشدن 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.

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)، ۲۴۷-۲۴۰. https://doi.org/10.22067/JSW.V0I0.9299

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-14]

الحوشان، محمد، زاهدی، مرتضی، رامین، علی‌اکبر، و سبزعلیان، 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 حکم علی‌پور، 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 باکتری های 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

صاحب حسن، 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 کوچکسرائی، مسعود (۱۳۹۹). تأثیر قارچ میکوریز و ریزوباکتری محرک رشد بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نهال استبرق تحت تنش خشکی. *فصلنامهٔ 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 پتابارور 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 اطرشی، 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-

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-14]

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., Rawlley, 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

Ansary, M. H., Rahmani, H. A., Ardakani, M. R., Paknejad, F., Habibi, D., & Mafakheri, S. (2012). Effect of *Pseudomonas fluorescent* 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

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/ijcmas.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

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

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-14]

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. l. 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.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-14]

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/20.1001.1.20089996.2019.9.4.5.9

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., Motesharezadeh, 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

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-14]

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

Mina Rafiei[1], Asghar Rahimi[1*], Arman Azari[1], Seyed Rasoul Sahhafi[1], Ahmad Aein[2], Pezhman Khodaygan[3]

[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 Eduction 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

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-14]