



به‌زرعی کشاورزی

دوره ۲۴ ■ شماره ۲ ■ تابستان ۱۴۰۱

صفحه‌های ۶۹۹-۶۸۵

DOI: 10.22059/jci.2022.319121.2519

مقاله پژوهشی:

اثر به‌کارگیری مایکوریزا و سیلیکات پتاسیم بر پارامترهای فتوسنتزی و فلورسانس کلروفیل توت‌فرنگی تحت تنش گرمایی

عالیه شفیعی^۱، مهدی حدادی نژاد^{۲*}، کامران قاسمی^۳، سعید عشقی^۴

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم باغبانی، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.

۲. استادیار، گروه علوم باغبانی، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.

۳. استادیار، گروه علوم باغبانی، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.

۴. استاد، گروه علوم باغبانی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۱۱

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۲۷

چکیده

به‌منظور بررسی اثر سیلیکات پتاسیم و قارچ مایکوریزا بر شاخص‌های فتوسنتزی توت‌فرنگی پژوهشی در سال ۱۳۹۸ در گلخانه پژوهشی دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی ساری اجرا شد. این پژوهش به‌صورت به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه فاکتور شامل قارچ مایکوریزا در دو سطح (وجود و عدم قارچ مایکوریزا)، سیلیکات پتاسیم در سه سطح (صفر، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) به شکل محلول‌پاشی و دما در دو سطح (۲۵ و ۴۱ درجه سانتی‌گراد) با سه تکرار انجام شد. نتایج نشان داد استفاده از سیلیکات پتاسیم منجر به کاهش خسارت تابش دریافتی در برگ‌های توت‌فرنگی شد. به‌طوری‌که در شرایط تنش گرمایی و با وجود دریافت ۱۱۳۳ میکرومول بر مترمربع بر ثانیه تابش فعال فتوسنتزی، مقدار تابش جذب‌شده تا سه برابر نسبت به شاهد کاهش یافت. برخلاف روند افزایشی تعرق در تیمار شاهد، تیمار بوته با سیلیکات پتاسیم در حضور مایکوریزا، مانع از افزایش تعرق و هدایت روزنه‌ای و هدررفت آب، برای خنک‌کردن برگ در طول تنش گرمایی شد. به‌طوری‌که تلفیح ریشه با قارچ مایکوریزا منجر به شبکه هیفی گسترده ریشه شد و کارایی مصرف آب را تا ۷۲ درصد بهبود داد. در نتیجه شرایط برای افزایش فتوسنتز خالص مهیا شد. هرچند تنش موجب افزایش فلورسانس پایه و کاهش بیشینه عملکرد کواتومی سیستم نوری II شد. اما استفاده هم‌زمان از مایکوریزا و سیلیکات پتاسیم توانست این شاخص را تا رسیدن به سطح خوب (۰/۷۶) بهبود دهد. در نهایت، مشخص شد که تنش دمای بالا بسیاری از فاکتورهای فتوسنتزی بوته توت‌فرنگی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و کاربرد سیلیکات پتاسیم هم‌زمان با قارچ مایکوریزا برخلاف کاربرد جداگانه آن‌ها، تا حد زیادی از آسیب گرما به بخش‌های مختلف بوته جلوگیری می‌نماید.

کلیدواژه‌ها: بیوفیزیک فلورسانس، پرولین، توت‌فرنگی، عملکرد کواتومی، هدایت روزنه‌ای.

The Effect of Mycorrhiza and Potassium Silicate Application on Photosynthetic and Fluorescence Parameters of Strawberry under Heat Stress

ALiyeh Shafiei¹, Mehdi Hadadinejad^{2*}, Kamran Ghasemi³, Saeed Eshghi⁴

1. Former M.Sc. Student, Department of Horticulture Sciences, Agronomy college, Sari Agriculture and Natural Resources University, Sari, Iran.

2. Assistant Professor, Horticultural Department, Agronomy college, Sari Agriculture and Natural Resources University, Sari, Iran.

3. Assistant Professor, Horticultural Department, Agronomy college, Sari Agriculture and Natural Resources University, Sari, Iran.

4. Professor, Horticultural Department, Shiraz University, Shiraz, Iran.

Received: February 15, 2021

Accepted: October 3, 2021

Abstract

The present research tries to investigate the effect of potassium silicate and mycorrhizal fungus on heat stress tolerance of strawberries and evaluate the possibility of increasing plant tolerance to heat at research greenhouse in Sari Agriculture and Natural Resources University at 2019. It is in a completely randomized factorial design with three factors including two levels of mycorrhizal fungi (presence and absence of mycorrhizal fungi), three levels of potassium silicate (0, 50 and 100 mg.l⁻¹) spray in heat stress (25 and 41 °C) with three replications. The results show that application of potassium silicate reduces the Photosynthetic active radiation (PAR) damage in strawberry leaves, which PAR of leaves bottom reduce three folds in comparison to the control, when the PARtop is 1133 umol.m⁻².s⁻¹. In contrast, treatment of the plant with potassium silicate in the presence of mycorrhiza prevented increases transpiration and stomatal conductivity for water cooling the leaves during heat stress. Inoculation of the roots with mycorrhiza fungi leads to a wide network of hyphae in root uptake, improving water use efficiency by up to 72%, which in turn results in increased net photosynthesis. However, heat stress increases minimum fluorescence and reduces maximal quantum efficiency of photosystem II. But the simultaneous application of mycorrhiza and potassium silicate is able to improve this index to a good level (0.76). Finally, it has been found that high temperature stress affects many photosynthetic factors of strawberry plant that the use of potassium silicate in combination with mycorrhizal fungus, despite their separate use, to a large extent prevents heat damage to different parts of the plant.

Keywords: Biophysical fluorescence, proline, quantum yield, stomatal conductivity, strawberry.

۱. مقدمه

امروزه یکی از چالش‌های مهم پیش روی کشاورزی در جهان پدیده گرم شدن زمین و به اصطلاح تغییر اقلیم مناطق مختلف جهان است. این پدیده بر محدوده جغرافیایی مناسب رشد و نمو گیاهان زراعی و باغی مؤثر بوده و موجب کاهش عملکرد و کیفیت بسیاری از محصولات کشاورزی شده است (Else & Atkinson, 2010). توت‌فرنگی رقم کاماروسا (*Fragaria × ananassa* Duch.) یک گونه هشت‌گان گل‌سرخیان و از مهم‌ترین میوه ریزها در سراسر جهان است (Biswas et al., 2007).

تغییر اقلیم و گرم شدن هوای کره زمین بر کمیت و کیفیت میوه توت‌فرنگی در بسیاری از کشورها آثاری منفی داشته است و در بسیاری از این مناطق از جمله ایالات متحده آمریکا و ترکیه بررسی‌هایی صورت گرفته است (Else & Atkinson, 2010; Fan et al., 2012). گرم شدن کره زمین بر کشت و کار توت‌فرنگی در ایران نیز اثر گذاشته است، به طوری که امکان تولید روندک از مزارع توت‌فرنگی استان مازندران به دلیل گرمای تابستان تقریباً غیرممکن شده است و این گیاه چندساله را باید به صورت یک‌ساله و با هزینه احداث جدید کشت و کار نمود. نظرسنجی از توت‌فرنگی‌کاران نشان داد تحمل به تنش‌های غیرزنده اولویت اصلی آن‌ها برای به‌نژادی ارقام توت‌فرنگی می‌باشد (Azizi & Hadadinejad, 2019)، بنابراین لازم است رفتارهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی ارقام مختلف توت‌فرنگی به تنش گرمایی و مکانیسم‌های دفاعی ارقام این گیاه در مقابل تنش گرمایی مشخص شود.

به‌طور کلی، دامنه دمای مناسب برای رشد بهینه گیاه توت‌فرنگی (برگ و میوه) ۲۶-۱۵ درجه سانتی‌گراد است و دماهای بالاتر از ۳۰ درجه سانتی‌گراد در منطقه ریشه و هوا از رشد گیاه به شدت جلوگیری می‌کند (MollaHosseini et

al., 2012). علاوه بر این، دمای بالای ۴۰ درجه سانتی‌گراد در روز و ۳۵ درجه سانتی‌گراد در شب از رشد روندک جلوگیری می‌کند، درحالی‌که گیاهانی که در دمای ۳۰/۲۵ درجه سانتی‌گراد بودند ۲۹ درصد روندک بیش‌تری از گیاهانی که در دمای ۲۰/۱۵ بودند، داشتند (Kadir et al., 2006). گزارش شده است که دامنه بحرانی دما که مانع رشد توت‌فرنگی می‌شود بین ۳۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد است. روندک‌های توت‌فرنگی اگر سه روز در معرض دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد قرار گیرند، رشدشان متوقف می‌شود. دمای بالا، به شدت رشد و عملکرد بوته توت‌فرنگی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. اولین صدمه‌ای که دمای بالا به گیاه توت‌فرنگی می‌زند ممانعت از فتوسنتز است. به این صورت که، با افزایش دما زنجیره انتقال الکترون در فتوسنتز I و II عملکرد چرخه‌ها دچار مشکل شده و فتوسنتز کاهش می‌یابد. هم‌چنین در دمای بالا روزنه‌های سطح برگ بسته شده و به این ترتیب دی‌اکسیدکربن برای ادامه فتوسنتز در اختیار گیاه قرار نمی‌گیرد (Kadir et al., 2006).

سیلیسیم به‌عنوان یک عنصر بسیار مؤثر در گیاه و به‌ویژه در گیاهانی که تحت تنش‌های مختلف مثل خشکی، شوری، بیماری‌زاهای گیاهی، آفات و حشرات و غیره قرار گرفته‌اند، محسوب می‌شود. سیلیسیم در گیاه سه وظیفه اصلی شامل ساختمانی، حفاظتی و فیزیولوژیکی دارد. وظایف فیزیولوژیکی سیلیسیم در گیاه مثل کاهش تعرق گیاهی، افزایش اکسیژن جهت جذب توسط ریشه که با تقویت دیواره کانال‌های هوایی بافت آثرانسیم انجام می‌گیرد. اگرچه برخی عناصر مانند سیلیسیم رشد گیاه را با پیشرفت فرایند فیزیولوژیکی افزایش می‌دهند. اما این عناصر به دلیل این‌که نقش آن‌ها در بیولوژی گیاهی هنوز شناخته نشده است در دسته عناصر ضروری قرار نگرفته و به نام عناصر مفید معروف هستند (Liang et al., 2006). از بین منابع مختلف سیلیسیم، استفاده از منبع سیلیکات‌پتاسیم توانسته در

کاماروسا از نهالستان تجاری توت‌فرنگی در روستای ارزفون ساری تهیه و در گلدان‌های چهار لیتری در اواخر اسفندماه کشت شدند. بوته‌ها با کودهای رایج رشد توت‌فرنگی به‌صورت خاکی تغذیه شدند. پس از رسیدن بوته به مرحله پنج‌برگی، به‌صورت هفتگی بوته‌ها با محلول سیلیکات پتاسیم (۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) محلول‌پاشی و بوته‌های شاهد نیز با آب مقطر محلول‌پاشی شدند. پس از استقرار، گیاهان در محیط کنترل‌شده (شاهد) نگه داشته شده و بقیه گیاهان به دمای تنش منتقل شدند. این آزمایش به‌صورت گلخانه‌ای در گروه علوم باغبانی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری انجام شد. یک گروه گلدان در فضای بدون تنش که درجه حرارت آن در روز 25 ± 1 و در شب 16 ± 1 درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی 60 ± 5 درصد بود و گروه دیگر گلدان‌ها در گلخانه تحت تنش قرار گرفتند. تنش گرمایی به تدریج اعمال شد. یعنی بوته‌ها در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده و هر ساعت دو درجه سانتی‌گراد دمای گلخانه اضافه شد. بعد از هفت ساعت که دمای گلخانه از ۲۵ درجه به ۳۹ درجه سانتی‌گراد رسید، دمای گلخانه روی 40 ± 1 درجه سانتی‌گراد تنظیم شده که زمان اعمال تیمارها هر روز هشت صبح تا چهار بعدازظهر بوده و بوته‌ها به‌مدت ۷۲ ساعت در این دما قرار گرفتند.

محیط کشت این آزمایش، ترکیب خاک مزرعه، خاک برگ پوسیده و ماسه به نسبت ۱:۱:۱ بود (نتیجه آزمون خاک جدول ۱). گلدان‌های چهار لیتری با استفاده از بستر کشت پر شده و نشاها درون آن کشت شدند. در تیمارهای مایکوریزا، مقدار ۵۰ گرم از مایه قارچی *Funeliformis mosseae* و در تیمارهای شاهد مقدار معادل آن از آمیخته بدون قارچ استفاده شد که در زمان انجام آزمایش با بررسی میکروسکوپی، حضور قارچ در ریشه تأیید شد. پس از پنج‌برگی شدن، بوته‌های توت‌فرنگی با تیمار سیلیسیم در سه سطح دو ماه و هر هفت روز یک‌بار محلول‌پاشی شدند.

کوتاه‌ترین زمان منجر به بهبود اثر منفی تنش گرمایی در توت‌فرنگی شود (Muneer et al., 2017).

یکی از مهم‌ترین میکروارگانیزم‌های موجود در اکثر خاک‌های تخریب‌نشده انواع قارچ‌های مایکوریزا هستند. به‌طورکلی، به همزیستی بین مسیلیوم قارچی مایکوریزا با ریشه گیاهان نیز مایکوریزا گفته می‌شود. از موارد مهم در سیستم پایدار خاک و گیاه می‌توان به قارچ‌های مایکوریزا اشاره کرد که با ریشه حدود ۹۷ درصد از گیاهان همزیستی دارند (Smith et al., 2011). در پژوهش‌های بسیاری آمده که قارچ‌های مایکوریزا روی رشد رویشی بسیاری از گیاهانی که با آن‌ها رابطه همزیستی بلندمدت برقرار کرده‌اند مؤثر بوده و موجب بهبود رشد و نمو آن‌ها می‌شوند (Abdelhafez & Abdel-Monsief, 2006). همزیستی قارچ‌های مایکوریزا با گیاهان از طریق بازنگهداشتن روزنه‌های زیر برگ، موجب تأخیر در کاهش محتوای نسبی آب برگ در طی انواع تنش می‌شود (Nagarathna et al., 2007). تلقیح گیاه با قارچ‌های مایکوریزا سبب افزایش سطح برگ و در ادامه افزایش مقدار کلروفیل آن‌ها می‌شود که در نهایت منجر به افزایش سرعت فتوسنتز خالص در تمام دوره رشد گیاه می‌شود (Wright, 2005). فعالیت قارچ‌های مایکوریزا سبب افزایش میزان پروتئین و قندهای محلول در برگ گیاهان میزبان می‌شود که به‌علت تجمع این ترکیبات در سلول رخ داده و از این طریق موجب کاهش پتانسیل آب برگ شده و گیاه را از آسیب‌های انواع تنش محافظت می‌کنند (Huang et al., 2009).

هدف از این آزمایش، بررسی اثر سیلیکات پتاسیم و قارچ مایکوریزا به‌عنوان راه‌کارهای کوتاه و بلندمدت در بهبود اثر منفی تنش گرمایی بر ویژگی‌های فتوسنتزی و برخی صفات رویشی توت‌فرنگی رقم کاماروسا می‌باشد.

۲. مواد و روش‌ها

در این پژوهش تعداد ۷۲ بوته گلدانی توت‌فرنگی رقم

جدول ۱. آزمون خاک مورداستفاده در آزمایش تنش گرمایی توت‌فرنگی

بافت	رس (%)	لای (%)	ماسه (%)	کربن آلی (%)	ماده آلی (%)	pH	EC (ms)
SL*	۱۳	۲۲	۶۵	۴/۰۴	۶/۹۵	۷/۰۶	۱/۵۷
-	مس (ppm)	روی (ppm)	منگنز (ppm)	آهن (ppm)	منیزیم (ppm)	پتاسیم (ppm)	فسفر (ppm)
-	۱/۵	۵/۹	۱۶/۴	۶۰/۷	۳۹۶	۱۵۰	۱۰/۸

*: بافت بستر از نوع شنی - لومی می‌باشد.

در فویل آلومینیومی به مدت ۴۸ ساعت در آون (خشک‌کن) با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد و سپس با ترازوی دیجیتال اندازه‌گیری و یادداشت شد. طول روندک به وسیله متر پارچه‌ای مورد اندازه‌گیری قرار گرفت.

جدول ۲. پارامترهای فتوستتزی مورد اندازه‌گیری

شاخص مورد اندازه‌گیری	واحد
تابش فعال فتوستتزی بالای برگ	PARtop $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
تابش فعال فتوستتزی پایین برگ	PARbot $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
تعرق	E $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
هدایت روزنه‌ای	GH ₂ O $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
فتوستتزر خالص	A $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
کارایی واقعی مصرف آب	A/GH ₂ O $\mu\text{molCO}_2/\text{mmol-1H}_2\text{O}$
کارایی مصرف آب	A/E $\mu\text{molCO}_2/\text{mmol-1H}_2\text{O}$

جدول ۳. شاخص‌های بیوفیزیک فلورسانس کلروفیل

شاخص مورد اندازه‌گیری	
فلورسانس حداقل	F ₀
فلورسانس حداکثر	F _m
حداکثر عملکرد کوانتومی فتوسیستم II	F _v /F _m

۲.۲. تجزیه و تحلیل داده‌های آماری

جهت تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار SAS (۹/۱) و مقایسه میانگین آن‌ها از MSTAT-C استفاده شد. میانگین داده‌ها با آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۵ درصد مقایسه و رسم نمودارها به کمک نرم‌افزار Excel (2016) انجام گرفت.

این پژوهش به صورت به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه فاکتور شامل قارچ میکوریزا در دو سطح (وجود و عدم قارچ میکوریزا)، سیلیکات پتاسیم (تجاری حاوی سیلیکات و پتاسیم به ترتیب ۲۰ و ۱۵ درصد) محصول شرکت دانش بنیان خوشه پروران زیست فناوری در سه سطح (صفر، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) به شکل محلول پاشی و دما در دو سطح (۲۵ و ۴۱ درجه سانتی‌گراد) با سه تکرار انجام شد.

۲.۱. صفات مورد اندازه‌گیری

اندازه‌گیری شاخص سبزی‌نگی با کلروفیل متر (SPAD-502) شرکت Konica Minolta ساخت کشور ژاپن) و همچنین صفات فتوستتزی (جدول ۲) و سنجش کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II (جدول ۳) در گلخانه از دستگاه فتوستتزمتر (WALZ، مدل GFS-3000 ساخت کشور آلمان) استفاده شد. برای این منظور بر روی جوان‌ترین برگ کاملاً توسعه یافته یک گیره مخصوص به مدت ۱۵ دقیقه قرار داده شد (به این ترتیب برگ با شرایط تاریکی شب سازگار شد) سپس با استفاده از دستگاه فلورسانس سنج مقدار فلورسانس هر برگ ثبت شد. برای این منظور حداقل فلورسانس (F₀)، حداکثر فلورسانس (F_m)، فلورسانس متغیر (F_v) و کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II (F_v/F_m) محاسبه شد.

صفات رشد رویشی بوته مادری و دختری

برای اندازه‌گیری وزن خشک برگ، طوقه و ریشه، نمونه‌ها

۳. نتایج

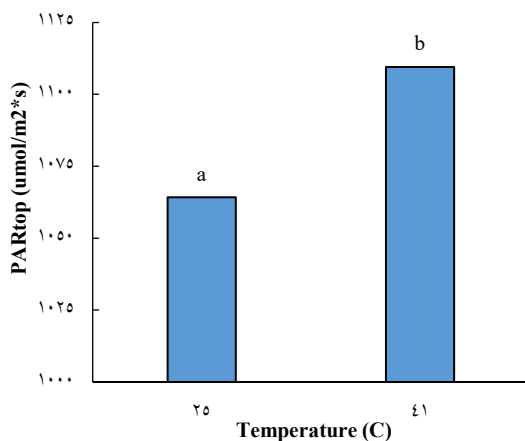
۱.۳. سنجش پارامترهای فتوسنتزی (PAR)

اثر ساده دما بر تابش فعال فتوسنتزی روی برگ (PARtop) و فتوسنتز خالص (A) در سطح احتمال یک درصد و هدایت روزنه‌ای (GH₂O) در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد، اما تأثیری بر تابش فعال فتوسنتزی زیر برگ (PARbot)، سرعت تعرق (E)، کارایی واقعی مصرف آب (A/GH₂O) و کارایی مصرف آب (A/E) نداشت. در حالی که تیمار با مایکوریزا تنها بر PARbot و E در سطح احتمال یک درصد تأثیر معنی‌دار گذاشت. اثر ساده سیلیکات‌پتاسیم بر PARbot، E، GH₂O و A/E در سطح احتمال یک درصد و بر A/GH₂O در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد.

اثر متقابل دما و مایکوریزا در سطح احتمال یک درصد بر E، GH₂O، A و A/E معنی‌دار گردید. همچنین اثر متقابل دما و سیلیکات‌پتاسیم بر PARbot، E، GH₂O، A/GH₂O و A/E در سطح احتمال یک درصد و بر PARtop در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد. در حالی که اثر متقابل سیلیکات‌پتاسیم و مایکوریزا تنها بر PARbot در سطح احتمال یک درصد و GH₂O در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد. اثر متقابل سه تیمار (دما، مایکوریزا و سیلیکات‌پتاسیم) بر E، GH₂O و A/E در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد.

۲.۳. تابش فعال فتوسنتزی رو و زیر برگ

تیمار دما به‌تنهایی بر تابش فعال فتوسنتزی روی برگ اثر معنی‌داری داشت. با توجه به شکل (۱)، تابش فعال فتوسنتزی روی برگ در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد به‌طور میانگین ۱۰۶۴/۲ میکرومول بر مترمربع در ثانیه بود که با افزایش ۵ درصدی در دمای ۴۱ درجه سانتی‌گراد به ۱۱۰۹/۵ میکرومول بر مترمربع در ثانیه رسید.



شکل ۱. تغییرات تابش فعال فتوسنتزی بالای برگ توت‌فرنگی تحت تنش گرمایی

با توجه به جدول (۴)، بیش‌ترین تابش فعال فتوسنتزی روی برگ تحت تنش گرمایی و بدون تفاوت معنی‌دار در نوع تیمار با سیلیکات‌پتاسیم و به میزان ۱۱۳۳ میکرومول بر مترمربع در ثانیه به‌دست آمد.

جدول ۴. مقایسه میانگین اثر متقابل دما و سیلیکات‌پتاسیم بر پارامترهای فتوسنتزی توت‌فرنگی

A/E umolCO ₂ /mmol- 1H ₂ O	A/GH ₂ O umolCO ₂ /mmol- 1H ₂ O	GH ₂ O mmol (m ² *s)	E mmol (m ² *s)	PARbot	PARtop umol/(m ² *s)	سیلیکات‌پتاسیم (mg.l ⁻¹)	دما
۵/۳a	۴۱۰/۱c	۵۱/۲b	۱/۷۱e	۲۲/۹b	۱۱۰۲ab	۰	۲۵°C
۲/۱۷c	۴۱۳bc	۱۱۱/۶a	۳/۶۲bc	۱۶/۱۳bc	۱۰۶۳ab	۵۰	
۲/۱۲c	۴۲۲/۴a	۱۱۷/۶a	۴/۲۲ab	۳۴/۵۲a	۱۰۲۷b	۱۰۰	
۴/۰۷b	۴۱۹/۲ab	۱۱۸/۵a	۳/۰۱cd	۱۱/۲۳c	۱۱۱۳a	۰	۴۱°C
۳/۴۵b	۴۱۸/۳ab	۷۴/۵۷b	۲/۷۷d	۳۰/۹۸a	۱۰۸۳ab	۵۰	
۲/۰۹c	۴۱۶/۷abc	۱۲۷/۹a	۴/۵۴a	۳۴/۶۸a	۱۱۳۳a	۱۰۰	

نتایج دارای حروف مشترک، تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

مجدد تعرق شد. کمترین سرعت تعرق در زمان بروز تنش دمایی در بوته‌های تیمار نشده با مایکوریزا و سیلیکات پتاسیم مشاهده شد. اما بیشترین تأثیر بر کاهش سرعت تعرق در هنگام بروز تنش دمایی با کاربرد سیلیکات پتاسیم ۵۰ میلی‌گرم در لیتر به دست آمد (شکل ۲).

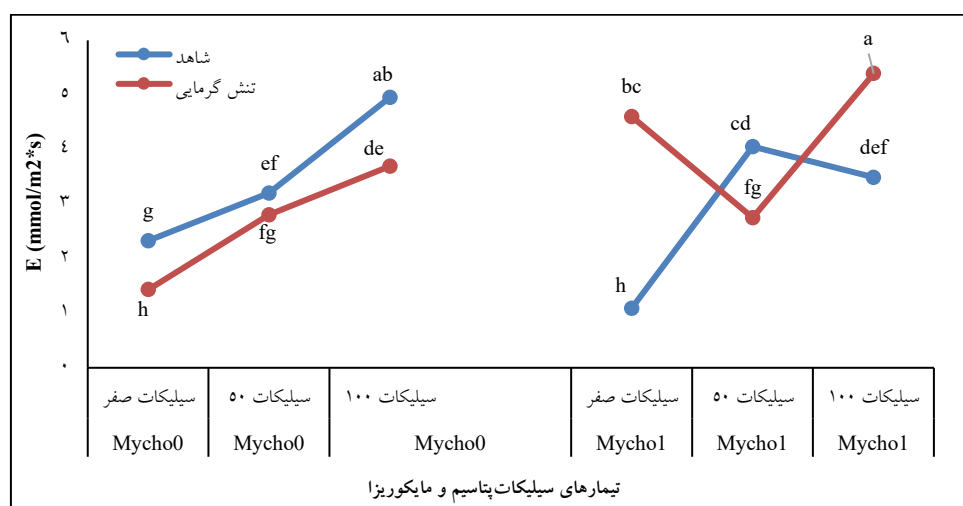
۴.۳. هدایت روزنه‌ای (GH₂O)

هدایت روزنه‌ای در تیمار شاهد با کاربرد سیلیکات پتاسیم با غلظت‌های مختلف روند افزایشی نشان داد. کاربرد سیلیکات پتاسیم در شرایط فاقد مایکوریزا موجب افزایش هدایت روزنه‌ای در تیمار شاهد شد و با افزایش غلظت سیلیکات پتاسیم بر هدایت روزنه‌ای برگ نیز افزوده شد، درحالی‌که با افزودن مایکوریزا، تأثیر غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات پتاسیم بیش از ۳۵ درصد بیش‌تر از غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر بود. در هنگام بروز تنش گرمایی، میزان هدایت روزنه‌ای متفاوت با شرایط بدون تنش بود. به‌طوری‌که با کاربرد سیلیکات پتاسیم ۵۰ میلی‌گرم در لیتر از هدایت روزنه‌ای کاسته شده و با کاربرد غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر بار دیگر روند افزایشی شد.

با توجه به جدول (۴)، تابش فعال فتوسنتزی زیر برگ با افزودن سیلیکات پتاسیم با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر در هر دو دمای ۲۵ و ۴۱ درجه سانتی‌گراد، ضمن افزایش به‌ترتیب ۱/۵ و ۳ برابری، منجر به بروز تفاوت معنی‌داری با شاهد شد.

۳.۳. سرعت تعرق (E)

با توجه به شکل (۲)، سرعت تعرق در بستر فاقد قارچ مایکوریزا روند افزایشی ثابتی داشت، به‌طوری‌که استفاده از غلظت‌های مختلف سیلیکات پتاسیم موجب افزایش سرعت تعرق شده و با افزایش غلظت این سرعت تعرق در گیاهان تحت تنش و بدون تنش بیش‌تر نیز شده است. با افزودن مایکوریزا، سرعت تعرق برگ فقط در تیمار تنش (بدون حضور سیلیکات پتاسیم) تا حدود دو برابر افزایش معنی‌داری پیدا کرد. افزودن مایکوریزا (۵۰ میلی‌گرم در لیتر) این روند را تا جایی‌که اختلاف معنی‌داری با شرایط بدون تنش (بدون مایکوریزا و در حضور سیلیکات پتاسیم) نداشت، کاهش داد. هرچند افزودن مقدار بیش‌تر از سیلیکات پتاسیم منجر به افزایش



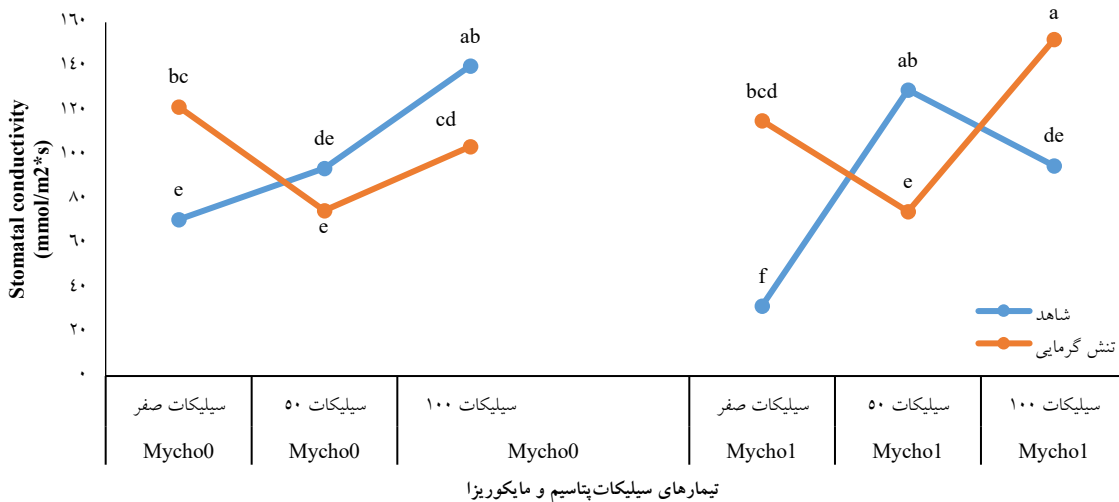
شکل ۲. تأثیر تنش گرمایی، تلقیح قارچ مایکوریزا و سیلیکات پتاسیم بر سرعت تعرق برگ توت‌فرنگی

اثر به کارگیری مایکوریزا و سیلیکات پتاسیم بر پارامترهای فتوسنتزی و فلورسانس کلروفیل توت فرنگی تحت تنش گرمایی

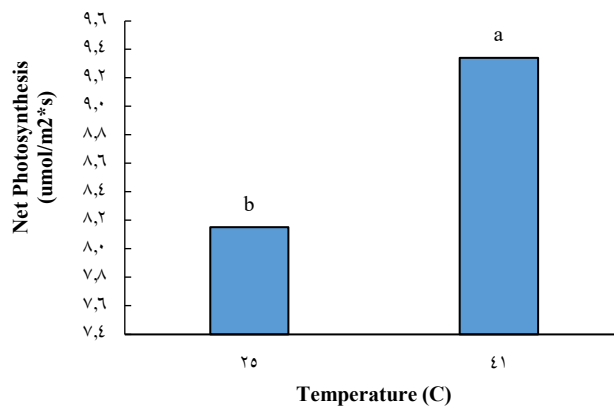
۵.۳. فتوستنز خالص (A)

براساس نتایج تجزیه واریانس، تنها اثر دما و اثر متقابل دما و مایکوریزا بر فتوستنز خالص تأثیر معنی دار در سطح احتمال یک درصد داشت و دیگر تیمارها تأثیری بر آن نداشتند. با توجه به شکل (۴)، فتوستنز خالص با بروز تنش دمایی افزایش معنی داری به میزان ۱۴/۵ درصد پیدا کرد و از ۸/۱۵ میکرومول دی اکسید کربن بر مترمربع در ثانیه به ۹/۳۴ میکرومول دی اکسید کربن بر مترمربع در ثانیه رسید.

این روند در شرایط فاقد مایکوریزا و حضور آن مشابه بود و بیشترین هدایت روزنه‌ای در شرایط بروز تنش گرمایی در گیاهان تلقیح شده با قارچ مایکوریزا با کاربرد سیلیکات پتاسیم با غلظت ۱۰۰ میلی گرم در لیتر با میانگین ۱۵۲/۱۳ میلی مول بر مترمربع در ثانیه مشاهده شد که حدود ۳۲ درصد افزایش نسبت به شاهد نشان داد. کمترین هدایت روزنه‌ای مربوط به شرایط بدون تنش در بوته‌های تلقیح شده با قارچ مایکوریزا و بدون کاربرد سیلیکات پتاسیم با میانگین ۳۱/۶۴ میلی مول بر مترمربع در ثانیه بود (شکل ۳).



شکل ۳. تأثیر تنش گرمایی، تلقیح قارچ مایکوریزا و سیلیکات پتاسیم بر هدایت روزنه‌ای برگ توت فرنگی



شکل ۴. تغییرات فتوستنز خالص گیاه توت فرنگی تحت تنش گرمایی

لیتر با افزایشی ۳ درصدی مواجه شد. درحالی که در شرایط بروز تنش گرمایی، کاربرد سیلیکات پتاسیم تأثیر معنی داری بر کارایی واقعی مصرف آب نداشت.

۳.۷. کارایی مصرف آب (A/E)

کارایی مصرف آب در بستر فاقد قارچ میکوریزا روند کاهشی ثابتی داشت و استفاده از سیلیکات پتاسیم سبب کاهش کارایی مصرف آب شده و با افزایش غلظت، کارایی مصرف آب در همه گیاهان کم تر نیز شده است. با افزودن میکوریزا، با کاربرد سیلیکات پتاسیم کارایی مصرف آب کاهش معنی داری پیدا کرد که تأثیر منفی سیلیکات پتاسیم ۵۰ میلی گرم در لیتر بیش تر از ۱۰۰ میلی گرم در لیتر بود. اما با بروز تنش گرمایی، این الگو دچار نوساناتی شد. به طوری که، با کاربرد سیلیکات پتاسیم ۵۰ میلی گرم در لیتر، منجر به افزایش ۷۲ درصدی کارایی مصرف آب شد که با کاربرد سیلیکات پتاسیم ۱۰۰ میلی گرم در لیتر، بار دیگر روند کاهشی در کارایی مصرف آب مشاهده شد. بیش ترین کارایی مصرف آب در شرایط بدون تنش در بوته های تلقیح شده با قارچ میکوریزا مشاهده شد (شکل ۵).

در هنگام بروز تنش گرمایی، کاربرد میکوریزا به تنهایی موجب افزایش فتوسنتز خالص شد، اما این افزایش معنی دار نبود. درحالی که در شرایط بدون تنش، کاربرد میکوریزا منجر به کاهش فتوسنتز خالص شد (جدول ۵).

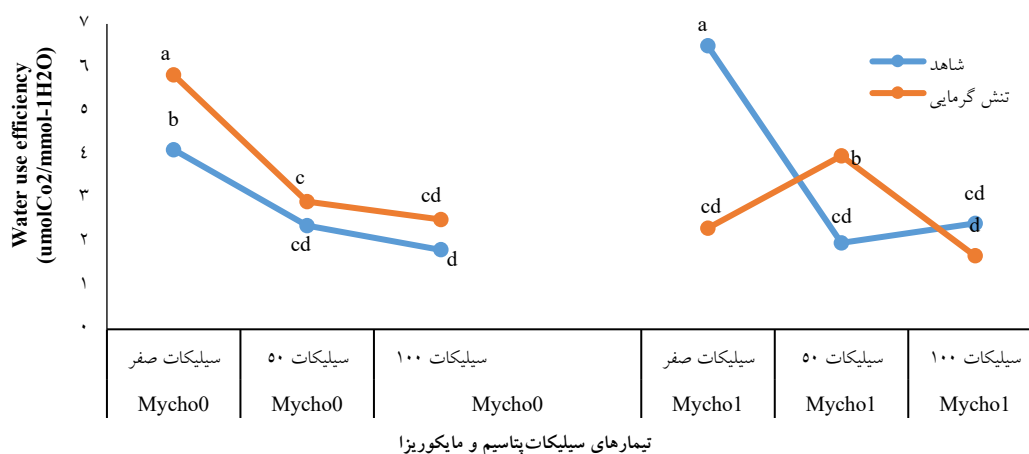
جدول ۵. مقایسه میانگین اثر متقابل دما و میکوریزا بر فتوسنتز خالص برگ توت فرنگی

دما	میکوریزا	A (umol/m ² s)
۲۵ °C	فاقد میکوریزا	۸/۵ab
	دارای میکوریزا	۷/۷۹b
۴۱ °C	فاقد میکوریزا	۸/۵۵ab
	دارای میکوریزا	۱۰/۱۲a

نتایج دارای حروف مشترک، تفاوت معنی داری با یکدیگر ندارند.

۳.۶. کارایی واقعی مصرف آب (A/GH₂O)

نتایج تجزیه واریانس نشان داد، تنها اثر سیلیکات پتاسیم و اثر متقابل سیلیکات پتاسیم و دما به ترتیب در سطح احتمال پنج و یک درصد بر کارایی واقعی مصرف آب معنی دار شد. کارایی واقعی مصرف آب در شرایط بدون تنش گرمایی با کاربرد سیلیکات پتاسیم با غلظت های مختلف افزایش معنی داری پیدا کرد و در غلظت ۱۰۰ میلی گرم در



شکل ۵. تأثیر تنش گرمایی، تلقیح قارچ میکوریزا و سیلیکات پتاسیم بر کارایی مصرف آب توت فرنگی

۸.۳. شاخص‌های بیوفیزیک فلورسانس کلروفیل

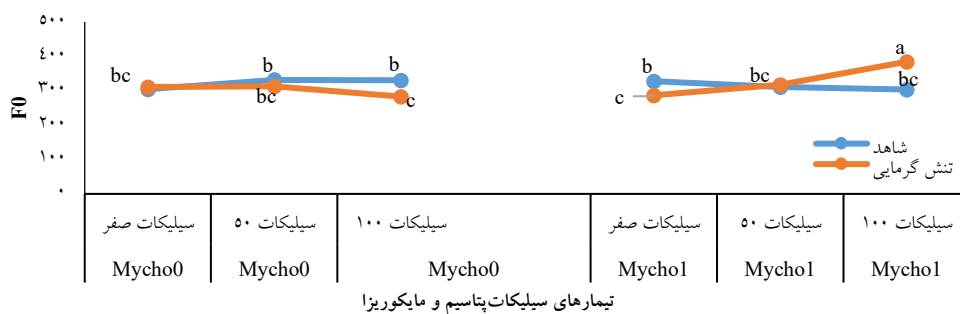
اثر ساده دما بر فلورسانس حداکثر برگ (F_m)، عملکرد کوانتومی (Y) و خاموشی غیرفتوشیمیایی (NPQ) در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد، اما تأثیر معنی‌داری بر فلورسانس حداقل برگ (F_0) و حداکثر عملکرد کوانتومی فتوسیستم II (F_v/F_m) نداشت. تیمار با مایکوریزا بر فلورسانس حداکثر برگ و عملکرد کوانتومی در سطح احتمال یک درصد و بر حداکثر عملکرد کوانتومی فتوسیستم II در سطح احتمال پنج درصد تأثیر معنی‌دار گذاشت. علاوه بر این، اثر ساده سیلیکات‌پتاسیم بر F_m ، Y و NPQ در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. اثر متقابل دما و مایکوریزا در سطح احتمال پنج درصد بر فلورسانس حداقل (F_0) در سطح احتمال یک درصد و بر Y در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد. هم‌چنین اثر متقابل دما و سیلیکات‌پتاسیم بر F_m و Y در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. اثر متقابل دما، سیلیکات‌پتاسیم و مایکوریزا بر F_0 ، F_m و Y در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد. اثر متقابل دما، سیلیکات‌پتاسیم و مایکوریزا بر F_0 ، F_m و Y معنی‌دار شد.

۹.۳. فلورسانس کلروفیل حداقل (F_0) و حداکثر (F_m)

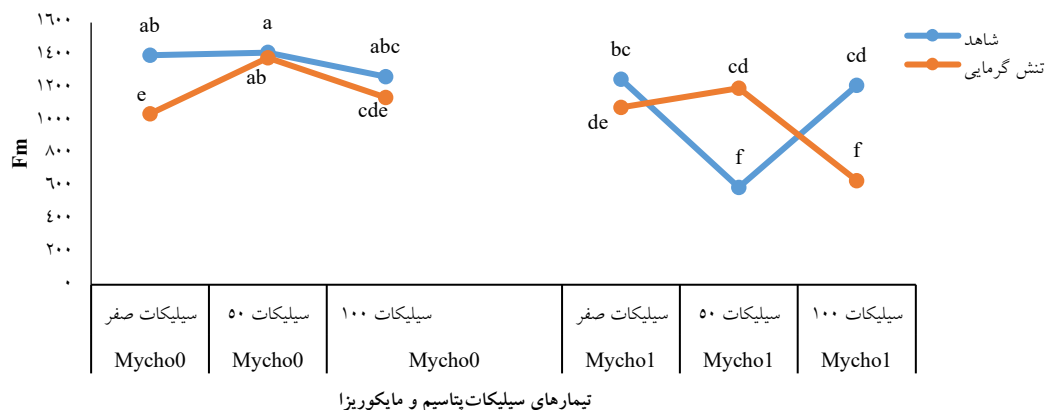
بوته‌های شاهد تنش دیده، کم‌ترین میزان فلورسانس پایه را نشان دادند. در بستر فاقد قارچ مایکوریزا کاربرد

سیلیکات‌پتاسیم با غلظت‌های مختلف تأثیر معنی‌داری بر فلورسانس حداقل گیاهان رشدیافته در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و نیز تحت تنش گرمایی نداشت، درحالی‌که در گیاهان تلقیح‌شده با قارچ مایکوریزا در هنگام بروز تنش گرمایی، استفاده از غلظت‌های مختلف سیلیکات‌پتاسیم موجب افزایش فلورسانس حداقل تا حدود ۳۴ درصد در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر شده و افزایش غلظت سیلیکات‌پتاسیم، بر مقدار فلورسانس حداقل نیز افزود. علاوه بر این، کم‌ترین فلورسانس حداقل در زمان بروز تنش دمایی مشاهده شد (شکل ۶).

با توجه به شکل (۷)، تأثیر کاربرد سیلیکات‌پتاسیم با غلظت‌های مختلف از الگوی خاصی پیروی نکرد. به‌طوری‌که در بستر فاقد قارچ مایکوریزا کاربرد سیلیکات‌پتاسیم با غلظت‌های مختلف منجر به کاهش فلورسانس حداکثر در شرایط بدون تنش شد اما در شرایط تنش، در ابتدا کاربرد غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر موجب افزایش فلورسانس حداکثر به میزان بیش از ۳۲ درصدی شد، اما با کاربرد غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر کاهش محسوسی رخ داد. در گیاهان تلقیح‌شده با قارچ مایکوریزا، در شرایط بدون تنش، کاربرد سیلیکات‌پتاسیم با غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر منجر به کاهش معنی‌دار و ۱۱۰ درصدی شد اما با کاربرد غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر، تفاوت معنی‌داری با شاهد اتفاق نیفتاد (شکل ۷).



شکل ۶. تأثیر تنش گرمایی، تلقیح قارچ مایکوریزا و سیلیکات‌پتاسیم بر کلروفیل فلورسانس حداقل برگ توت‌فرنگی



شکل ۷. تأثیر تنش گرمایی، تلقیح قارچ مایکوریزا و سیلیکات پتاسیم بر کلروفیل فلورسانس حداکثر برگ توت فرنگی

جدول ۷. مقایسه میانگین اثر متقابل مایکوریزا و سیلیکات پتاسیم بر حداکثر عملکرد کوانتومی فتوسیستم II در برگ توت فرنگی

Fv/Fm	سیلیکات پتاسیم (mg.l ⁻¹)	مایکوریزا
۰/۷۴a	۰	
۰/۷۷a	۵۰	فاقد مایکوریزا
۰/۷۴a	۱۰۰	
۰/۷۲ab	۰	
۰/۶۷b	۵۰	دارای مایکوریزا
۰/۷۶a	۱۰۰	

۳.۱۱. تعداد و طول روندک

باتوجه به جدول (۸)، بیشترین تعداد روندک در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد و در حضور قارچ مایکوریزا با میانگین ۴/۶۱ روندک به دست آمد که با تعداد روندک در شرایط تنش دمایی در فقدان یا حضور مایکوریزا به ترتیب با مقادیر ۳/۷۷ و ۳/۵۵ روندک تفاوت معنی داری ندارد.

جدول ۸. مقایسه میانگین اثر متقابل دما و مایکوریزا بر تعداد روندک توت فرنگی

دما	مایکوریزا	تعداد روندک
۲۵ °C	فاقد مایکوریزا	۲/۲۷b
	دارای مایکوریزا	۴/۶۱a
۴۱ °C	فاقد مایکوریزا	۳/۷۷a
	دارای مایکوریزا	۳/۵۵ab

نتایج دارای حرف مشترک تفاوت معنی داری نسبت به یکدیگر ندارند.

در گیاهان تحت تنش، استفاده از سیلیکات پتاسیم ۵۰ میلی گرم در لیتر موجب افزایش فلورسانس حداکثر شد، اما این افزایش معنی دار نبود و در نهایت با کاربرد غلظت ۱۰۰ میلی گرم در لیتر کاهش معنی داری در حدود دو برابر در میزان فلورسانس حداکثر مشاهده شد (شکل ۷).

۳.۱۰. بیشینه عملکرد کوانتومی سیستم نوری II (Fv/Fm)

اثر ساده مایکوریزا و اثر متقابل سیلیکات پتاسیم و مایکوریزا به ترتیب در سطح احتمال پنج و یک درصد بر حداکثر عملکرد کوانتومی فتوسیستم II معنی دار شد، درحالی که سایر تیمارها تأثیر معنی داری بر این شاخص نداشتند (جدول ۷). با توجه به جدول (۷)، در گیاهان تلقیح نشده با قارچ مایکوریزا، کاربرد سیلیکات پتاسیم با غلظت های مختلف تأثیر معنی داری بر حداکثر عملکرد کوانتومی فتوسیستم II گیاهان نداشت، درحالی که در گیاهان تلقیح شده با قارچ مایکوریزا، کاربرد سیلیکات پتاسیم با شاهد تفاوت معنی داری ایجاد نکرد، اما غلظت ها نسبت به یکدیگر تفاوت معنی داری داشتند. استفاده از غلظت ۱۰۰ میلی گرم در لیتر سیلیکات پتاسیم نسبت به غلظت ۵۰ میلی گرم در لیتر موجب افزایش ۹ درصدی Fv/Fm شد.

اثر به‌کارگیری مایکوریزا و سیلیکات پتاسیم بر پارامترهای فتوسنتزی و فلورسانس کلروفیل توت‌فرنگی تحت تنش گرمایی

جدول ۱۰. مقایسه میانگین اثرمتقابل مایکوریزا و سیلیکات پتاسیم بر تعداد و طول روندک توت‌فرنگی

مایکوریزا	سیلیکات پتاسیم (mg.l ⁻¹)	تعداد روندک	طول روندک (cm)
فاقد مایکوریزا	۰	۲/۵c	۲۷/۸۵a
	۵۰	۳/۵۸bc	۲۳/۹۴b
مایکوریزا	۱۰۰	۳bc	۲۱/۷۲bc
	۰	۴/۱۶ab	۲۰/۶۲cd
دارای مایکوریزا	۵۰	۵/۳۳a	۲۳/۴۸bc
	۱۰۰	۲/۷۵c	۱۷/۵۸d

نتایج دارای حرف مشترک تفاوت معنی‌داری نسبت به یکدیگر ندارند.



شکل ۸. تأثیر تنش گرمایی بر طول روندک توت‌فرنگی.

۱۲.۳. وزن ترو خشک برگ بوته مادری

با توجه به شکل (۹)، کم‌ترین وزن تر در غلظت صفر سیلیکات پتاسیم مشاهده شد. درحالی‌که در تیمار شاهد وزن تر برگ با استفاده از سیلیکات پتاسیم افزایش معنی‌داری پیدا کرد، با این‌وجود، در گیاهان تحت تنش دمایی با افزایش غلظت سیلیکات پتاسیم تغییری اندک در میزان محتوای نسبی آب برگ ایجاد نمود که در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از شاهد بود. اما با افزودن مایکوریزا، وزن تر برگ به‌جز وقتی که از سیلیکات پتاسیم ۵۰ میلی‌گرم در لیتر استفاده شده بود، کاهش معنی‌داری یافت یا بدون تغییر باقی ماند.

با توجه به جدول (۹)، بیش‌ترین تعداد روندک در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و با کاربرد سیلیکات پتاسیم با غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر با میانگین ۵/۰۸ روندک حاصل شد که با تعداد روندک در شرایط تنش دمایی در غلظت‌های صفر و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات پتاسیم به‌ترتیب با مقادیر ۴/۱۶ و ۳/۸۳ روندک تفاوت معنی‌داری ندارد.

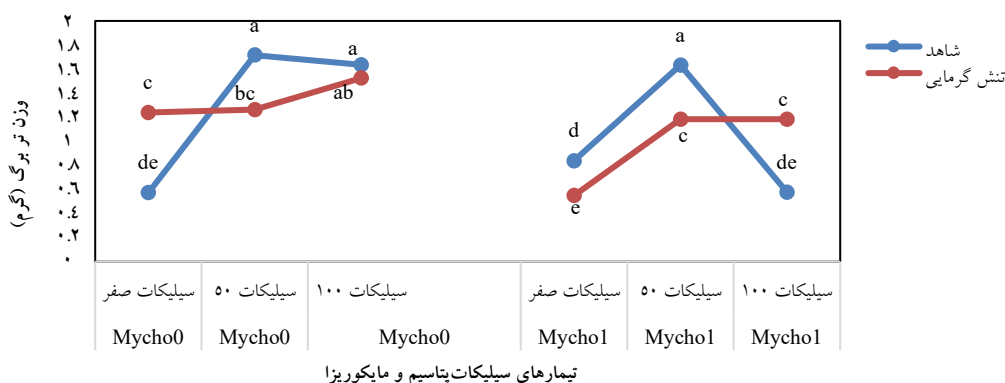
جدول ۹. مقایسه میانگین اثرمتقابل دما و سیلیکات پتاسیم بر تعداد روندک توت‌فرنگی

دما	سیلیکات پتاسیم (mg.l ⁻¹)	تعداد روندک
۲۵ °C	۰	۲/۵c
	۵۰	۵/۰۸a
	۱۰۰	۲/۷۵c
۴۱ °C	۰	۴/۱۶ab
	۵۰	۳/۸۳abc
	۱۰۰	۳bc

نتایج دارای حرف مشترک تفاوت معنی‌داری نسبت به یکدیگر ندارند.

با توجه به جدول (۱۰)، بیش‌ترین تعداد روندک در افزودن مایکوریزا به‌همراه کاربرد سیلیکات پتاسیم با غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر با میانگین ۵/۳۳ روندک مشاهده شد که با تعداد روندک در شرایط افزودن مایکوریزا و بدون کاربرد سیلیکات پتاسیم با میانگین ۴/۱۶ روندک تفاوت معنی‌داری ندارد. بیش‌ترین طول روندک در شرایط فاقد مایکوریزا و بدون کاربرد سیلیکات پتاسیم با میانگین ۲۷/۸۵ سانتی‌متر حاصل شد که با سایر سطوح تیماری تفاوت معنی‌داری ایجاد نمود (جدول ۱۰).

برخلاف تصور، تنش دمایی موجب افزایش طول روندک شد، به‌طوری‌که طول روندک در شرایط بدون تنش ۲۰/۹۴ سانتی‌متر بود که با افزایش ۱۵ درصدی به ۲۴/۱۱ سانتی‌متر در تنش گرمایی رسید (شکل ۸).



شکل ۹. تأثیر تنش گرمایی، تلقیح قارچ مایکوریزا و سیلیکات پتاسیم بر وزن تر برگ توت‌فرنگی

اجتناب می‌کنند. سپس این برگ‌ها با استفاده از تعرق و با از دست‌دادن آب خشک می‌شوند (Firmansyah & Argosubekti, 2019). در این پژوهش ضعف بوته‌های توت‌فرنگی در دفع تابش اضافه خورشیدی با استفاده از سیلیکات برطرف شد و بوته‌های تیمار شده با ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات پتاسیم تا سه برابر بیش‌تر از شاهد، نور رسیده به برگ را از خود عبور دادند. چرا که سیلیسیم به دلیل رسوب در پهنک برگ، استحکام برگ‌ها و نیز غلظت کلروفیل در واحد سطح برگ را افزایش می‌دهد و از این طریق توانایی گیاه برای استفاده مؤثر از نور را بالا می‌برد (Yousefi *et al.*, 2014).

این موضوع باعث شد تا برخلاف روند افزایشی تعرق در تیمار شاهد، بوته تیمار شده با سیلیکات پتاسیم بتواند در حضور مایکوریزا نیاز به افزایش تعرق و هدایت روزنه‌ای را برای غلبه کامل بر تنش گرمایی برطرف نماید. چراکه افزایش تعرق، در برگ‌های تنش دیده می‌تواند منجر به آسیب ناشی از جذب انرژی زیاد شود (Firmansyah & Argosubekti, 2019).

با افزایش دما از ۱۰ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد، میزان فتوسنتز به‌طور منطقی افزایش نشان می‌دهد. کاربرد سیلیسیم منجر به غلظت‌های بالاتر آنزیم ریپولوز بیس فسفات کربوکسیلاز در برگ می‌شود.

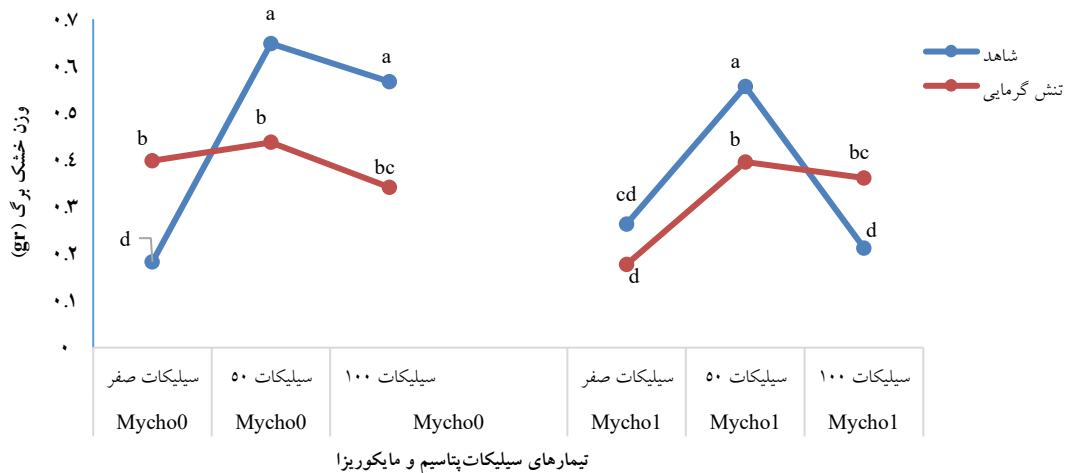
با توجه به شکل (۱۰)، الگوی تغییرات وزن خشک برگ در تیمار شاهد و بروز تنش دمایی شکل نسبتاً ثابتی داشت، به‌طوری‌که استفاده از غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات پتاسیم موجب افزایش وزن خشک برگ شد، اما کاربرد غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر سبب کاهش وزن خشک برگ توت‌فرنگی شد. در تیمار شاهد، کاربرد سیلیکات پتاسیم ۵۰ میلی‌گرم در لیتر با افزودن مایکوریزا و نیز در فقدان آن به‌ترتیب افزایش معنی‌داری به میزان بیش از ۲/۱ و ۳/۵ برابری وزن خشک برگ شد. درحالی‌که این افزایش در شرایط تنش دمایی چندان چشم‌گیر نبوده و تنها در شرایط افزودن مایکوریزا غلظت ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر بدون تفاوت معنی‌دار نسبت به یکدیگر موجب افزایش بیش از دو برابری وزن خشک برگ شد.

کم‌ترین وزن خشک برگ در زمان بروز تنش دمایی در بوته‌های تلقیح‌شده با قارچ با میانگین ۰/۱۷۷ گرم مشاهده شد که با میزان وزن خشک برگ در تیمار شاهد فاقد مایکوریزا با میانگین ۰/۱۸۲ گرم تفاوت معنی‌داری ندارد (شکل ۱۰).

۴. بحث

در تابش شدید خورشید و دماهای بالا، گیاهان با کاهش جذب تابش خورشیدی از گرم‌شدن بیش از حد برگ

اثر به‌کارگیری مایکوریزا و سیلیکات پتاسیم بر پارامترهای فتوسنتزی و فلورسانس کلروفیل توت‌فرنگی تحت تنش گرمایی



شکل ۱۰. تأثیر تنش گرمایی، تلقیح قارچ مایکوریزا و سیلیکات پتاسیم بر وزن خشک برگ توت‌فرنگی

مواجهه شد. اما بیش‌بود نور خورشید در مناطق خشک با افزایش تعرق و هدایت روزنه‌ای جهت استفاده از ظرفیت خنک‌کنندگی آب برای مقابله با افزایش دمای برگ منجر به بروز کمبود آب بوته می‌شود و وضعیت آبی بوته که مهم‌ترین جزء تحت تأثیر دماست و دارای همبستگی با میزان تنش گرمایی است را متأثر می‌کند (Firmansyah, 2019). در پژوهش حاضر که در منطقه مرطوب مازندران انجام شده، تیمار بوته‌های تنش‌دیده، با سیلیکات پتاسیم ۵۰ میلی‌گرم در لیتر، منجر به افزایش ۷۲ درصدی کارایی مصرف آب آن‌ها شد. کاهش تعرق از جمله وظایف فیزیولوژیکی سیلیسیم در گیاه است که با تقویت دیواره کانال‌های بافت آثرانسیم انجام می‌گیرد (Liang et al., 2006).

تنش‌های محیطی موجب افزایش فلورسانس پایه و کاهش بیشینه عملکرد کوانتومی سیستم نوری II (Fm/Fv) می‌شوند که نشان‌دهنده گسستگی رنگدانه‌های برداشت نور از مجموعه سیستم نوری II می‌باشد و عملکرد کوانتومی سیستم نوری II را کاهش می‌دهد. در گونه‌های درختان مناطق معتدله شمالی گزارش شده در صورتی‌که

این آنزیم سوخت‌وساز دی‌اکسیدکربن را تنظیم کرده و در نتیجه کارایی تثبیت دی‌اکسیدکربن توسط گیاهان را افزایش و در نهایت منجر به بهبود فتوسنتز گیاه می‌شود (Yousefi et al., 2014). با این حال به‌نظر می‌رسد در پژوهش حاضر، تلقیح بوته توت‌فرنگی با قارچ مایکوریزا بوده که در زمان وقوع تنش منجر به افزایش سطح برگ و در ادامه افزایش مقدار کلروفیل آن‌ها شده و در نهایت منجر به افزایش سرعت فتوسنتز خالص در بوته شد (Wright, 2005). گزارش شده قارچ‌های میکوریزی با داشتن شبکه هیفی گسترده و افزایش سطح و سرعت جذب ریشه، کارایی گیاهان را در جذب آب و عناصر غذایی به‌ویژه عناصر کم تحرک فسفر، روی و مس را افزایش می‌دهند و موجب بهبود رشد آن‌ها می‌شوند (Eshghi et al., 2020).

بر همین اساس در این پژوهش بوته‌های تلقیح‌شده با قارچ مایکوریزا، بیش‌ترین کارایی مصرف آب در شرایط بدون تنش را نشان دادند و کارایی واقعی مصرف آب در شرایط بدون تنش گرمایی با کاربرد سیلیکات پتاسیم در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر با افزایشی سه درصدی

دما را روی کمیت روندک خشی کند اما امکان جبران کیفیت از دست‌رفته را ندارد.

۵. نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش نشان داد که تنش دمای بالا موجب افزایش پارامترهای فتوسنتزی مثل A، GH_2O و PARtop شد. در مجموع، تنش گرمایی (۴۱ درجه سانتی‌گراد) بر شاخص‌های فتوسنتزی گیاه توت‌فرنگی تأثیر منفی داشت. کاربرد سیلیکات‌پتاسیم موجب اثر معنی‌دار بر فلورسانس حداکثر، عملکرد کوانتومی، تابش فعال فتوسنتزی زیر برگ، هدایت روزنه‌ای، کارایی واقعی مصرف آب و کارایی مصرف آب گذاشت. کاربرد قارچ میکوریزا به‌تنهایی و در کنار سیلیکات‌پتاسیم تأثیر مثبتی بر شاخص‌های مورد اندازه‌گیری داشت. تلقیح با قارچ میکوریزا بر فلورسانس حداکثر، حداکثر عملکرد کوانتومی فتوسیستم II و عملکرد کوانتومی تأثیر مثبت داشت. در نهایت، مشخص شد که تنش دمای بالا بسیاری از فاکتورهای فتوسنتزی گیاه توت‌فرنگی را تحت تأثیر قرار می‌دهد که کاربرد سیلیکات‌پتاسیم هم‌زمان با قارچ میکوریزا برخلاف کاربرد جداگانه آن‌ها، تا حدود زیادی از ورود آسیب گرما به بخش‌های مختلف گیاه جلوگیری نموده و مانع از دست‌رفتن کمیت روندک می‌شود.

۶. تشکر و قدردانی

صمیمانه از زحمات کارکنان و مدیریت محترم گروه علوم باغبانی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، تشکر و قدردانی می‌گردد.

۷. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

نسبت Fm/Fv در گستره ۰/۷۶۰ تا ۰/۸۳۰ باشد، عملکرد کوانتومی سامانه نوری II در بازه عالی و اگر این مقدار در گستره ۰/۷۰۰ تا ۰/۷۶۰ باشد، یعنی عملکرد کوانتومی سامانه نوری II در گستره خوب قرار دارد (Karami et al., 2017). در پژوهش حاضر استفاده هم‌زمان از میکوریزا و سیلیکات‌پتاسیم توانست این شاخص را تا رسیدن به سطح خوب بهبود دهد. گزارش شده که سیلیسیم می‌تواند باعث افزایش هدایت روزنه‌ای و کارایی فتوسیستم II در گیاه سویا شود (Murillo-Amador et al., 2007). به‌کارگیری سیلیکات‌پتاسیم منجر به کاهش H_2O_2 و O_2 منفی می‌شود، چرا که بررسی بیان ژن‌های دو پروتئین مربوط به فتوسیستم I و II نشان داده اثرات منفی دمای بالا را به‌وسیله حفظ پروتئین‌های فتوسنتزی و پروتئین‌های پاسخ به تنش با مکانیسم گلوکاتینون اسکوربات محدود می‌کنند (Muneer et al., 2017). کم‌ترین وزن تر و خشک در شاهد معمولی (بدون میکوریزا و سیلیکات) مشاهده شد. تقریباً در تمام تیمارها وزن تر برگ با استفاده از سیلیکات‌پتاسیم ۵۰ میلی‌گرم در لیتر افزایش معنی‌داری پیدا کرد. با این حال، به‌طورکلی تنش گرمایی در حضور میکوریزا (بدون حضور سیلیکات) منجر به کاهش وزن تر و خشک برگ شد. قارچ‌های میکوریزا با گسترش شبکه‌هایی از هیف در بیرون ریشه موجب بالا رفتن جذب و انتقال مواد غذایی از خاک به ریشه شده و سبب بهبود رشد و عملکرد گیاه می‌شوند (Balakrishnan & Subramanian, 2012).

گزارش شده که تعداد روندک، تعداد طوقه و برگ توت‌فرنگی در دمای بیش از ۴۰ درجه سانتی‌گراد روز و دمای ۳۵ درجه شب، حدود سه برابر کم‌تر از دمای بهینه در ۲۶ درجه سانتی‌گراد بوده است، که با نتایج این پژوهش مطابقت ندارد (Kadir et al., 2006). چراکه به‌نظر می‌رسد دما و شرایط بهینه شب می‌تواند اثر منفی

۸. منابع

- Abdelhafez, A. A., & Abdel-Monsief, R. A. (2006). Effects of VA mycorrhizal inoculation on growth, yield and nutrient content of cantaloupe and cucumber under different water regimes. *Journal of Agriculture and Biological Sciences*, 2(6), 503-508.
- Azizi, M., Hadadinejad, M., Menatizadeh, M. (2019). Factors affecting educational needs of strawberry growers in Mazandaran. *Agricultural Education administration Research*, 11(51), 21-140. (In Persian)
- Balakrishnan, N., & Subramanian, K. S. (2012). Mycorrhizal symbiosis and bioavailability of micronutrients in maize grain. *Maydica*, 57(2), 129-138.
- Biswas, M. K., Islam, R., & Hossain, M. (2007). Somatic embryogenesis in strawberry (*Fragaria* sp.) through callus culture. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 90(1), 49-54.
- Else, M., & Atkinson, C. (2010). Climate change impacts on UK top and soft fruit production. *Outlook on Agriculture*, 39(4), 257-262.
- Eshghi, S., Shirdel, M., Gharaqani, A., & Zarei, M. (2020). Morpho-physiological, quantitative and qualitative responses of two strawberry (*Fragaria × ananassa*) cultivars to heat stress in presence of arbuscular mycorrhiza fungus. *Journal of Plant Process and Function*, 9(38), 245-264. (In Persian)
- Fan, W., Zhang, M., Zhang, H., & Zhang P. (2012). Improved tolerance to various abiotic stresses in transgenic sweet potato (*Ipomoea batatas*) expressing spinach betaine aldehyde dehydrogenase. *PLOS ONE*, 7(5), e37344.
- Firmansyah, F., & Argosubekti, N. (2020). A review of heat stress signaling in plants. International Conference on Sustainable Cereals and Crops Production Systems in the Tropics 23-25 September 2019, Makassar City, Indonesia. 484: 1-11.
- Huang, H., Zhang, S., Wu, N., Luo, L., & Christie, P. (2009). Influence of *Glomus etunicatum*/*Zea mays* mycorrhiza on atrazine degradation, soil phosphatase and dehydrogenase activities, and soil microbial community structure. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(4), 726-734.
- Kadir, S., Sidhu, G., & Al-Khatib, K. (2006). Strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch.) growth and productivity as affected by temperature. *HortScience*, 41(6), 1423-1430.
- Karami, J., Eshghi, S., & Tafazoli, E. (2017). Leaf gas exchange and chlorophyll fluorescence in yaghooti grapevine under heat stress conditions in greenhouse and vineyard. *Iranin Journal of Horticultural Science and Technology*, 18 (3), 237-250. (In Persian)
- Kadir, S., Sidhu, G., & Al-Khatib, K. (2006). Strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch.) growth and productivity as affected by temperature. *HortScience*, 41(6), 1423-1430.
- Liang, Y., Hua, H., Zhu, Y. G., Zhang, J., Cheng, C., & Rmheld, V. (2006). Importance of plant species and external silicon concentration to active silicon uptake and transport. *New Phytologist*, 172(1), 63-72.
- MollaHosseini, H., Bahrani, F., Ghayour, F., & Baghi, A. (2012). *Strawberry production* (complete and illustrated guide to strawberry production by soil and hydroponic cultivation). Tehran, Agricultural Education and Extension Publications, 228 p. (In Persian).
- Muneer, S., Park, Y.G., Kim, S., & Jeong, R.B. (2017). Foliar or subirrigation silicon supply mitigates high temperature stress in strawberry by maintaining photosynthetic and stress-responsive proteins. *Journal of Plant Growth Regulation*, 36, 836-845.
- Murillo-Amador, B., Yamada, S., Yamaguchi, T., Rueda-Puente, E., Ávila-Serrano, N., García-Hernández, J. L., & Nieto-Garibay, A. (2007). Influence of calcium silicate on growth, physiological parameters and mineral nutrition in two legume species under salt stress. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 193(6), 413-421.
- Nagarathna, T. K., Prasad, T. G., Bagyaraj, D. J., & Shadakshari, Y. G. (2007). Effect of arbuscular mycorrhiza and phosphorus levels on growth and water use efficiency in sunflower at different soil moisture status. *Journal of Agricultural Technology*, 3(2), 221-229.
- Smith, S. E., Jakobsen, I., Grønlund, M., & Smith, F. A. (2011). Roles of arbuscular mycorrhizas in plant phosphorus nutrition: interactions between pathways of phosphorus uptake in *Arbuscular mycorrhizal* roots have important implications for understanding and manipulating plant phosphorus acquisition. *Plant Physiology*, 156(3), 1050-1057.
- Wright, S. F. (2005). Management of arbuscular mycorrhizal fungi. *Roots and Soil Management: Interactions between Roots and the Soil*, 48, 181-197.
- Yousefi, M., Enteshari, S., & Saadatmand, M. (2014). Effects of silica treatment on some morphological, anatomical and physiological characteristics of Iranian borage (*Echium amoenum* Fisch & C.A. Mey). *Journal of Soil and Plant Interactions*, 5 (2), 83-94. (In Persian)