

تأثیر سیلیکات پتاسیم و ال-سیستین بر عملکرد، کارایی مصرف آب و کیفیت میوه فیسالیس (*Physalis peruviana* L.) تحت شرایط کم آبی

آرزو خانی^۱، طاهر برزگر^{۱*}، جعفر نیکبخت^۲

۱- گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۲- گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

نویسنده مسئول: طاهر برزگر - tbarzegar@znu.ac.ir

چکیده

امروزه به دلیل تغییرات آب و هوا و کاهش بارندگی، تولید محصولات کشاورزی در بسیاری از مناطق، بخصوص مناطق خشک و نیمه خشک با مشکل مواجه شده است. به همین منظور، جهت مطالعه تأثیر محلول پاشی سیلیکات پتاسیم و ال-سیستین بر کارایی مصرف آب، عملکرد کمی و کیفی فیسالیس (*Physalis peruviana* L.) تحت شرایط کم آبی، آزمایشی به صورت کرت‌های خرد شده بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در مزرعه پژوهشی دانشگاه زنجان در سال ۱۴۰۱ انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل سه سطح آبیاری (۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه) به عنوان فاکتور اصلی و محلول پاشی سیلیکات پتاسیم در سه سطح (۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ میلی گرم در لیتر)، اسید آمینه ال-سیستین در دو سطح (۲۰ و ۴۰ میلی گرم در لیتر) و آب مقطر (شاهد) به عنوان فاکتور فرعی بود. نتایج نشان داد که تنش کم آبی محتوای مواد جامد محلول کل، اسید قابل تیتراسیون، کاروتنوئید و پروتئین میوه را افزایش و میزان ویتامین ث، تعداد میوه و عملکرد میوه را کاهش داد. کاربرد سیلیکات-پتاسیم به ویژه در سطوح ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ میلی گرم در لیتر و اسید آمینه ال-سیستین محتوای کاروتنوئید، اسید قابل تیتراسیون، ویتامین ث و پروتئین و عملکرد میوه را در شرایط آبیاری ۱۰۰ درصد و تنش کم آبی بهبود بخشیدند. بیشترین عملکرد میوه با کاربرد سیستین ۴۰ میلی گرم در لیتر به ترتیب در شرایط آبیاری ۱۰۰ و ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه به دست آمد. بیشترین کارایی مصرف آب (۲/۵۳ و ۲/۴۳ کیلوگرم در مترمکعب) به ترتیب در گیاهان تیمار شده با ۲۰ و ۴۰ میلی گرم در لیتر سیستین تحت شرایط آبیاری ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه و تیمار ۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر سیلیکات پتاسیم در شرایط آبیاری ۵۰ درصد نیاز آبی حاصل شد. لذا، کاربرد ۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر سیلیکات پتاسیم و یا ۴۰ میلی گرم در لیتر سیستین جهت افزایش کیفیت و عملکرد میوه فیسالیس در شرایط آبیاری نرمال و تنش کم آبی پیشنهاد می گردد.

کلید واژه‌ها: تعداد میوه، کاروتنوئید، مواد جامد محلول، ویتامین ث

مقدمه

فیسالیس یا عروسک پشت پرده (*Physalis peruviana* L.) گیاهی علفی و یکساله از خانواده Solanaceae است که میوه رسیده آن ارزش خوراکی و دارویی دارد و دارای مقادیر بالایی از ویتامین‌های A، B و C، پروتئین و مواد معدنی فسفر، آهن و آنتی‌اکسیدان‌ها می باشد. علاوه بر این، به عنوان منبعی از ترکیبات زیست فعال است که نقش مثبتی در سلامت انسان و صنعت پزشکی دارد. با این حال، مناطق تولید فیسالیس به دلیل تغییرات آب و هوایی جهانی، به طور گسترده‌ای مستعد دوره‌های خشکسالی و کم آبی هستند (Rugeles Reyes et al., 2019).

با توجه به کمبود منابع آبی، کم آبی به عنوان یک عامل تنش‌زا، تهدیدی برای امنیت غذایی جهان می‌باشد و با کاهش سطح برگ، بسته شدن روزنه‌ها، کاهش تنظیم اسمزی و هدایت روزنه‌ای و کاهش ساخت پروتئین و کلروفیل، سبب تقلیل فرآیند فتوسنتز و در نهایت سبب کاهش رشد و عملکرد گیاه می‌شود (Kapoor *et al.*, 2020). همچنین به دلیل تغییر متابولیسم گیاه، سبب تغییر در تعادل هورمونی و افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) و گونه‌های فعال نیتروژن (RNS) می‌شود که متابولیسم طبیعی سلول را با ایجاد پراکسیداسیون لیپیدها، اکسیداسیون پروتئین‌ها و آسیب به اسیدهای نوکلئیک مختل می‌کند (Sharma *et al.*, 2020). با این حال، گیاهان به‌طور طبیعی می‌توانند از طریق مکانیسم‌های دفاعی شامل سیستم‌های دفاع آنتی‌اکسیدانی آنزیمی و غیرآنزیمی و تولید پروتئین‌ها، تنش اکسیداتیو را تحمل کنند (Basu *et al.*, 2016). گزارش شده است که در فیسالیس رقم پروویانا با کاهش سطوح آبیاری، تعداد میوه، وزن تر میوه، مواد جامد محلول، کیفیت میوه فیسالیس و در نهایت عملکرد میوه کاهش یافت که انتظار می‌رود به دلیل کاهش گلدهی و افزایش در میزان ریزش گل باشد (Barbosa *et al.*, 2019). همچنین گزارش شد که افزایش شدت تنش کم آبی باعث افزایش تخریب غشاء و پراکسیداسیون لیپیدی، و در نتیجه تشدید نشت یونی در گیاه فیسالیس شد (Rugeles Reyes *et al.*, 2019).

یکی از راهکارهای تعدیل اثرات منفی ناشی از تنش خشکی، تغذیه گیاه در جهت افزایش تحمل آن به تنش، حفظ کمیت و کیفیت گیاهان است. اخیراً توجه زیادی به معرفی برخی از مواد طبیعی یا زیستی برای افزایش تحمل گیاهان به تنش آبی شده است (El-Saadony *et al.*, 2021). سیلیس به عنوان یک عنصر مفید برای گیاه، نقش مثبتی در تعدیل آثار نامطلوب تنش‌های مختلف زیستی و غیر زیستی دارد که در محصولاتی نظیر گوجه‌فرنگی و خیار گزارش شده است (Sahebi *et al.*, 2015). مکانیسم اثرگذاری سیلیکون بر تعدیل اثرات تنش‌های زیستی و غیرزیستی در گیاهان بیشتر به نقش آن در استحکام دیواره سلولی، تنظیم فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی و آنزیمی گیاه، تشکیل کمپلکس‌های پایدار با عناصر سمی و افزایش زیست‌فراهمی عناصر غذایی ضروری گیاه از طریق اثرگذاری بر خصوصیات خاک گزارش شده است (Pavlovic *et al.*, 2021). کاربرد سیلیکون در گیاه رازیانه با تاثیر بر برخی فعالیت‌های فیزیولوژیکی، مقادیر مواد مغذی و افزایش تنظیم‌کننده‌های اسمزی، با حفظ یکپارچگی و پایداری غشای سلولی، تحمل به کم آبی، و در نتیجه رشد و عملکرد گیاه را بهبود بخشید. همچنین تیمار ۷/۵ میلی‌مولار سیلیکات-پتاسیم محتوای کلروفیل، کاروتنوئید، آنتوسیانین، پرولین و قندهای محلول را افزایش و سبب کاهش ۲۸ درصدی نشت یونی نسبت به تیمار شاهد گردید (Asgharipour and Mosapour, 2016). از این رو، می‌تواند به‌عنوان محرکی برای دفاع بیوشیمیایی و آنتی‌اکسیدانی باشد (Araújo *et al.*, 2019).

اسیدآمینها به‌عنوان کود زیستی به‌منظور بهبود رشد و افزایش کمی و کیفی محصولات کاربرد دارند و ممکن است به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم در کاهش تنش‌های اکسیداتیو گیاه نقش داشته باشند (Garcia *et al.*, 2011). ال-سیستئین یک اسیدآمین حاوی گوگرد است که به‌عنوان یک آنتی‌اکسیدان قوی و یک جاذب کارآمد برای گونه‌های فعال اکسیژن عمل می‌کند. این به دلیل وجود زنجیره جانبی تیول است که به آرامی اکسید می‌شود و از آسیب اکسیداتیو ناشی از تنش‌های زیستی و غیرزنده محافظت می‌کند (Genisel *et al.*, 2015). ال-سیستئین در سیتوزول، پلاستیدها و میتوکندری از سرین سنتز می‌شود و یکپارچگی غشاء را با کاهش تجمع نشت یونی و مالون‌دی‌آلدید حفظ می‌کند. پیش‌ماده پروتئین‌ها، ویتامین‌ها، کوفاکتورها، آنتی‌اکسیدان‌ها مانند گلوکاتئون و برخی از ترکیبات دفاعی است و گزارش شده است که میوه تحت تیمار با ال-سیستئین دارای ویتامین ث، آنتوسیانین، فلاونوئیدها و فنل و

مجله فرایند و کارکرد گیاهی

فعالیت آنتی‌اکسیدانی بالاتری نسبت به شاهد در شرایط تنش بود (Sogvar et al., 2020). همچنین نتایج نشان داد که کاربرد ال-سیستئین در غلظت‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر در کلم بروکلی، سطح برگ، وزن تازه شاخه‌ها، وزن خشک ریشه و عملکرد بوته را افزایش داد (Shekari and Javanmardi, 2017).

به دلیل خشکسالی‌های متوالی چند سال اخیر و کمبود آب کشاورزی در ایران به نظر می‌رسد کشاورزان به منظور کاهش آب مصرفی باید مدیریتی صحیح و منطقی را در پیش بگیرند (Pourmohamad et al., 2019). علیرغم نقش مثبت اسیدآمین‌ها و سیلیکات‌پتاسیم در افزایش تحمل گیاهان به تنش کم‌آبی، اطلاعات کمی در مورد اثر مستقل آن‌ها در سبزی‌ها وجود دارد. بر همین اساس پژوهش حاضر به منظور بررسی ویژگی‌های رشدی، عملکرد و کیفیت میوه فیسالیس (*Physalis peruviana* L.) تحت تاثیر محلول‌پاشی برگ سیلیکات‌پتاسیم و اسیدآمین‌ال-سیستئین در شرایط تنش کم‌آبی انجام شد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش به صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در گلخانه و مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان در سال ۱۴۰۱ انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل سه سطح -آبیاری (۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه) به عنوان فاکتور اصلی، سیلیکات‌پتاسیم (Si) در سه سطح (۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر) و اسید آمینه ال-سیستئین (Cys) در دو سطح (۲۰ و ۴۰ میلی‌گرم در لیتر) و محلول‌پاشی با آب مقطر (شاهد) به عنوان فاکتور فرعی بود. پارامترهای هواشناسی و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش، به ترتیب در جدول ۱ و ۲ آورده شده است.

جدول ۱- میانگین پارامترهای هواشناسی ایستگاه سینوپتیک زنجان در دوره رشد (۱۴۰۱) گیاه فیسالیس

| ماه | دما حداکثر (°C) | دمای حداقل (°C) | میانگین رطوبت نسبی (%) | ساعات آفتابی | مجموع تبخیر (mm) | مجموع بارندگی (mm) |
|--------|-----------------|-----------------|------------------------|--------------|------------------|--------------------|
| خرداد | ۳۰/۲ | ۱۲/۲ | ۳۱/۴ | ۱۰/۵ | ۳۱۶/۵ | ۰/۱ |
| تیر | ۳۳/۷ | ۱۵/۶ | ۳۰/۲ | ۱۱/۹ | ۳۸۴/۳ | ۰/۰ |
| مرداد | ۳۴/۹ | ۱۶/۵ | ۳۴/۷ | ۱۱/۳ | ۳۱۹/۸ | ۰/۰ |
| شهریور | ۳۲/۲ | ۱۲/۲ | ۲۸/۹ | ۱۰/۳ | ۲۷۵/۲ | ۰/۰ |
| مهر | ۲۷/۷ | ۹/۰ | ۳۶/۲ | ۹/۴ | ۲۰۱/۳ | ۰/۵ |
| آبان | ۱۵/۶ | ۲/۹ | ۶۵/۲ | ۶/۱ | ۶۷/۵ | ۲۱/۱ |

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه

| بافت خاک | ماده آلی (%) | پتاسیم (گرم بر کیلوگرم) | سدیم (گرم بر کیلوگرم) | کلسیم (گرم بر کیلوگرم) | نیتروژن (%) | EC (دسی‌زیمنس بر متر) | pH |
|----------|--------------|-------------------------|-----------------------|------------------------|-------------|-----------------------|-----|
| لوم رسی | ۰/۹۴ | ۰/۲۰ | ۰/۱۳ | ۰/۱۲ | ۰/۰۷ | ۱/۴۹ | ۷/۴ |

بذرهای فیسالیس در سینی‌های کشت با بستر پیت‌ماس-پرلیت با نسبت ۵۰:۵۰ کشت شد و در شرایط دمایی 25 ± 2 درجه سانتی‌گراد در روز و 20 ± 2 درجه سانتی‌گراد در شب با رطوبت نسبی ۶۵ درصد رشد یافت. پس از

مجله فرایند و کارکرد گیاهی

آماده شدن زمین، نشاهای فیسالیس در اواخر اردیبهشت ماه در مرحله ۴ تا ۵ برگ حقیقی با فاصله ۱۵۰ سانتی متر بین ردیف‌ها و ۵۰ سانتی متر بین بوته‌ها در مزرعه کشت شد و دو هفته پس از استقرار کامل گیاهان، محلول‌پاشی برگی سیلیکات پتاسیم و ال-سیستین، سه بار در مرحله رشد رویشی (۸ تا ۱۰ برگی)، آغاز گلدهی و ظهور اولین میوه با فاصله ۱۵ روز انجام شد (Sholehah et al., 2022; Singh et al., 2022). زمان محلول‌پاشی برای تمام تیمارها یکسان بود و برای محلول‌پاشی تیمار شاهد از آب مقطر استفاده شد. تیمارهای آبیاری یک هفته پس از اولین محلول‌پاشی اعمال شد و نیاز آبی گیاه برای تیمار شاهد با استفاده از میانگین داده‌های روزانه و داده‌های سال جاری شاخص‌های هواشناسی ثبت شده در ایستگاه هواشناسی زنجان و رابطه‌ی استاندارد فائو-پنمن-مانتیس برآورد گردید (وزیری و همکاران، ۱۳۸۷).

$$ET_c = ET_0 \times K_c \quad \text{رابطه (۱)}$$

ET_c : نیاز آبی فیسالیس (میلی متر در روز)، ET_0 : تبخیر-تعرق گیاه مرجع چمن (میلی متر در روز) و K_c : ضریب گیاهی فیسالیس (بدون واحد). لازم به توضیح است مقادیر ET_0 بر اساس روش استاندارد فائو-پنمن-مانتیس برآورد شد. پس از محاسبه مقادیر ET_c ، مقادیر نیاز خالص و نیاز ناخالص آب آبیاری گیاه فیسالیس بر اساس فواصل کشت، نوع سیستم آبیاری (قطره‌ای-نواری) دور آبیاری (سه روز) برآورد شد و سپس در هر نوبت آبیاری به گیاه داده می‌شد. نیاز آبی سایر تیمارها (تیمارهای تنش آبی) بر اساس نیاز آبی تیمار شاهد و درصد تنش آبی، برآورد و توزیع شد. در پایان دوره‌ی رشد، از هر واحد آزمایشی با حذف اثر حاشیه‌ای از پنج بوته نمونه‌برداری و برای اندازه‌گیری صفات مورد نظر به آزمایشگاه دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان منتقل شد.

صفات مورد ارزیابی:

در پایان دوره‌ی رشد، تعداد میوه‌ها پس از برداشت شمارش و به منظور ارزیابی عملکرد، با ترازوی دیجیتال گرمی وزن شدند. عملکرد کل به صورت کیلوگرم در هکتار برآورد شد.

کارایی مصرف آب (WUE)، با تقسیم نمودن عملکرد کل میوه (Y) به آب مصرفی (W) در طی فصل رشد بر حسب کیلوگرم در مترمکعب برآورد گردید.

$$WUE = Y \text{ (kg)} / W \text{ (m}^3\text{)} \quad \text{رابطه (۲)}$$

برای سنجش کاروتنوئید میوه از روش Arnou (1949) استفاده شد. برای این منظور، ۰/۵ گرم از بافت تازه میوه در هاون چینی با ۱۰ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد ساییده شد. سپس با دور ۵۰۰۰ به مدت ۵ دقیقه سانتریفیوژ گردید. میزان جذب محلول رویی با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر SAFAS MONACO (RS 232) در طول موج-های ۴۸۰ و ۵۱۰ نانومتر قرائت شد. در نهایت غلظت کاروتنوئید بر حسب میلی‌گرم بر گرم وزن تر با استفاده از رابطه دو محاسبه گردید که در این رابطه (V) بیانگر حجم نهایی عصاره در استون ۸۰ درصد، (W) وزن تازه بافت استخراج شده، (A) جذب در طول موج مشخص می‌باشد.

$$\text{کاروتنوئید میوه} = [7.6 (A480) - 1.49 (A510)] \times V / (W \times 1000) \quad \text{رابطه (۳)}$$

مجله فرایند و کارکرد گیاهی

محتوای مواد جامد محلول میوه (TSS) با استفاده از دستگاه رفرکتومتر دیجیتالی مدل ATago-ATC-20(E) اندازه‌گیری شد و میزان مواد جامد محلول بر حسب درصد بریکس بیان شد.

اسیدیته قابل تیتراسیون (TA) بر اساس اسید آلی غالب میوه فیسالیس (اسید سیتریک) به روش تیترا با هیدروکسیدسدیم با استفاده از رابطه سه اندازه‌گیری شد (AOAC, 2000). در این رابطه (E) اکسید والان اسید مورد نظر، (N) نرمالیه محلول هیدروکسیدسدیم، (S) مقدار هیدروکسیدسدیم مصرف شده (میلی لیتر)، (F) فاکتور NaOH، (C) مقدار عصاره را نشان می‌دهد.

$$\text{رابطه (۴)} \quad (\%) = [E \times N \times S \times F / C] \times 100 \quad \text{اسیدیته قابل تیتراسیون}$$

برای اندازه‌گیری آسکوربیک اسید (ویتامین ث) میوه، عصاره به روش متافسفریک استخراج شد. جذب محلول حاصل در طول موج ۵۲۰ نانومتر خوانده شد. غلظت اسید آسکوربیک با استفاده از منحنی استاندارد تهیه شده از غلظت‌های مختلف آسکوربیک اسید در حضور دی‌کلرواندوفنل محاسبه شد (AOAC, 2000).

برای سنجش پروتئین کل، یک گرم از میوه فیسالیس، در ۱۰ میلی‌لیتر بافر فسفات ۵۰ میلی‌مولار با اسیدیته ۷/۸ ساییده و عصاره حاصل به مدت ۱۵ دقیقه با ۱۴۰۰۰ دور سانتریفیوژ شد. ۱ میلی‌لیتر بافر بردفورد به ۱۰۰ میکرولیتر عصاره پروتئینی افزوده و شدت جذب مخلوط حاصل پس از ۲ دقیقه با اسپکتروفتومتر مدل SAFAS MONACO (RS 232) در طول موج ۵۹۵ نانومتر خوانده شد. از آلبومین گاوی برای رسم منحنی استاندارد تعیین غلظت پروتئین‌ها استفاده گردید (Bradford, 1976).

برای اندازه‌گیری درصد ماده خشک میوه (Dry matter)، وزن تر ۵ میوه از هر بوته و جمعا ۲۵ میوه از هر واحد آزمایشی توزین و سپس به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه آن قرار داده و وزن خشک میوه‌ها به دست آمد و با استفاده از رابطه پنج، درصد وزن خشک میوه به دست آمد (Rezaei Nejad and Ismaili, 2013).

$$\text{رابطه (۵)} \quad \text{Dry matter} = (DW / FW) \times 100$$

آنالیز داده‌های حاصل با استفاده از نرم‌افزار SAS V9.3 و مقایسه میانگین داده‌ها از طریق آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح یک و پنج درصد مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفتند.

نتایج و بحث

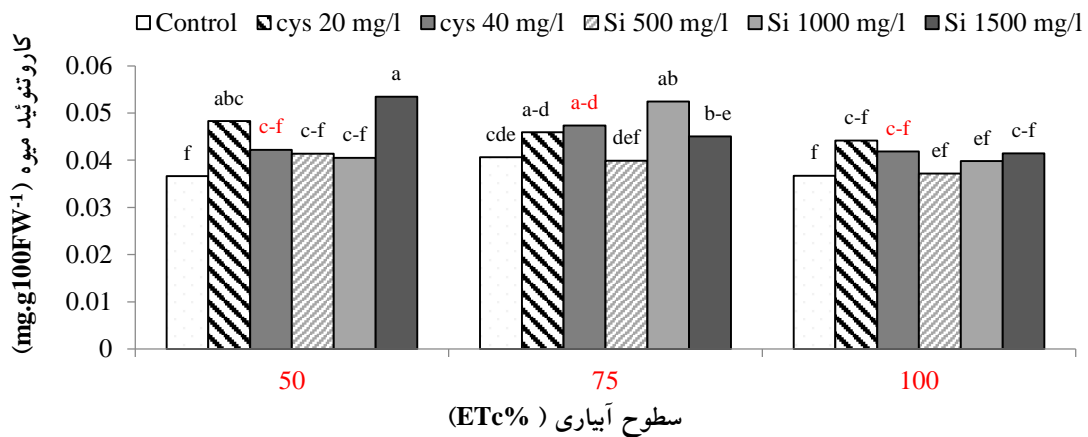
کاروتنوئید میوه

نتایج نشان داد که اثر ساده تیمارهای آبیاری و محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم و سیستین بر کاروتنوئید میوه در سطح احتمال یک درصد و اثر متقابل آنها در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). اعمال تنش کم‌آبی و کاربرد سیلیکات پتاسیم و سیستین میزان کاروتنوئید میوه را به‌طور قابل‌توجهی افزایش داد. نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیشترین مقدار کاروتنوئید میوه (۰/۰۵۳ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) با کاربرد ۱۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات پتاسیم در تنش کم‌آبی ۵۰ درصد نیاز آبی به دست آمد (شکل ۱).

جدول ۲. تجزیه واریانس اثر سیلیکات پتاسیم و اسید آمینه ال-سیستین بر صفات کیفی میوه فیسالیس در شرایط تنش کم آبی

| منابع تغییرات | درجه آزادی | میانگین مربعات | | | |
|------------------|------------|-----------------|-----------------|-----------------------|------------|
| | | کاروتنوئید میوه | مواد جامد محلول | اسید قابل تیتراسیون | ویتامین ث |
| تکرار | ۲ | ۰/۰۰۰۰۱۷ | ۰/۰۲۷۴ | ۰/۰۰۰۴۹ | ۹۲/۷۵۷۴ |
| آبیاری | ۲ | ۰/۰۰۰۱۱۹** | ۸/۳۴۱۹** | ۰/۰۴۸۹۳ ^{ns} | ۱۰۶۱۳/۵۷** |
| خطای کرت اصلی | ۴ | ۰/۰۰۰۰۰۲ | ۰/۱۰۳۶ | ۰/۰۳۵۸ | ۱۳/۱۷۷۸ |
| تیمار (Cys و Si) | ۵ | ۰/۰۰۰۱۱۳** | ۱/۵۷۶۱** | ۰/۳۴۷۳۱** | ۸۰۰/۸۳۸۸** |
| آبیاری × تیمار | ۱۰ | ۰/۰۰۰۰۴۳** | ۰/۶۲۴۶** | ۰/۱۴۹۲۸** | ۳۷۲/۸۴۸* |
| خطای کرت فرعی | ۳۰ | ۰/۰۰۰۰۱۸ | ۰/۱۵۵۶ | ۰/۰۲۸۷۸ | ۱۴۲/۱۲۱۲ |
| ضریب تغییرات (%) | - | ۹/۸۷ | ۲/۸۱ | ۶/۶۴ | ۸/۲۶ |

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی دار، معنی دار در سطح ۵٪ و ۱٪



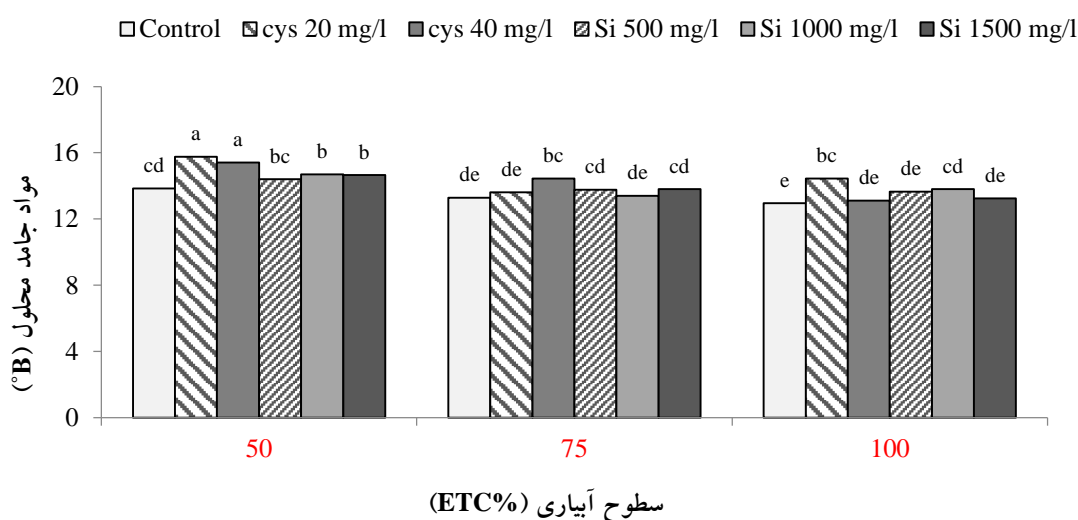
شکل ۱. اثر سیلیکات پتاسیم و اسید آمینه ال-سیستین بر کاروتنوئید میوه فیسالیس در شرایط تنش کم آبی. حروف مشابه نشان دهنده عدم معنی داری در سطح احتمال خطای ۵ درصد است.

یکی از پاسخ‌های ثانویه حاصل از تنش کم آبی در گیاهان، افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن است. در طول تنش اکسیداتیو، گیاهان قادر به مقابله با تولید بیش از حد گونه‌های فعال اکسیژن با استفاده از یک پاسخ آنتی-اکسیدانی آنزیمی و یا غیرآنزیمی نظیر کاروتنوئید هستند (Raziq et al., 2022). کاروتنوئیدها از دستگاه فتوسنتزی علیه رادیکال‌های آزاد محافظت می‌کنند. همچنین این رنگیزه‌ها از پراکسیداسیون لیپید ممانعت کرده و در پایداری غشاء نقش مهمی دارند که با نتایج مطالعات انجام شده در سیب زمینی مبنی بر افزایش کاروتنوئید با اعمال تنش کم آبی مطابقت دارد (Batoool et al., 2020). در پژوهشی که بر روی فلفل دلمه‌ای انجام شد، دریافتند که افزودن سیلیس باعث حفظ محتوای کلروفیل a، b و کاروتنوئیدها در شرایط تنش کم آبی گردید (Lobato et al., 2009). این افزایش

ممکن است به تاثیر سیلیکون به بهبود ساختار کلروپلاست و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز نسبت داده شود (Gong *et al.*, 2008). همچنین سیلیس با حذف رادیکال‌های آزاد اکسیژن، باعث بهبود سیستم دفاعی گیاه و افزایش کارایی فتوسیستم II و عملکرد کوانتومی در گیاهان تحت تنش کم‌آبی می‌گردد (Tripathi *et al.*, 2017).

مواد جامد محلول

با اعمال تنش کم‌آبیاری، میزان مواد جامد محلول در میوه فیسالیس افزایش یافت. میزان مواد جامد محلول از ۱۳/۵۳ درصد بریکس در تیمار آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی به ۱۴/۷۹ درصد بریکس در تیمار کم‌آبی ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه رسید. کاربرد تیمارهای سیلیکات‌پتاسیم و سیستین همچنین باعث افزایش میزان مواد جامد محلول میوه شد (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری و تیمار محلول‌پاشی نشان داد که بیشترین مقدار مواد جامد محلول میوه (۱۵/۷۵ و ۱۵/۴ درصد بریکس) به ترتیب با کاربرد ۲۰ و ۴۰ میلی‌گرم در لیتر ال-سیستین در شرایط کم‌آبی ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه حاصل شد (شکل ۲).



شکل ۲. اثر سیلیکات‌پتاسیم و اسیدآمینو ال-سیستین بر میزان مواد جامد محلول میوه فیسالیس در شرایط تنش کم‌آبی. حروف مشابه نشان‌دهنده عدم معنی‌داری در سطح احتمال خطای ۵ درصد است.

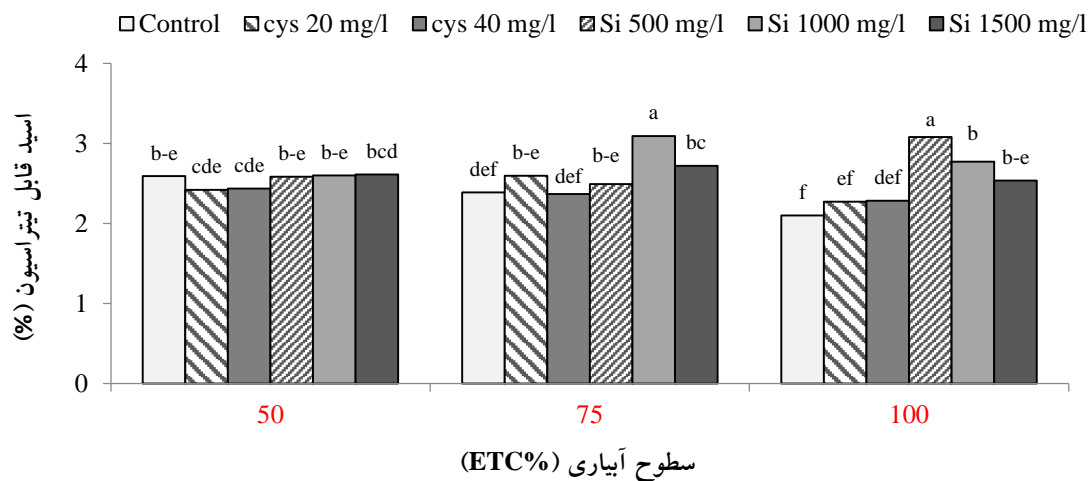
مقدار مواد جامد محلول، ارتباط بسیار نزدیکی با قند کل نشان می‌دهد و به‌عنوان یک مشخصه‌ی کیفی مهم در نظر گرفته می‌شود (Keshavarzpour and Rashidi, 2011). کاهش آبیاری منجر به کاهش محتوای آب میوه شده در نتیجه باعث بهبود مقدار مواد جامد محلول میوه می‌شود (Zhang *et al.*, 2017). مطابق پژوهش حاضر، افزایش مواد جامد محلول با اعمال تنش کم‌آبی در گوجه‌فرنگی (Shao *et al.*, 2015) و فلفل دلمه‌ای (Daneshpajouh *et al.*, 2018) نیز گزارش شده است که می‌تواند به دلیل کاهش تعداد میوه در اثر ریزش گل و در نتیجه افزایش نسبت کربوهیدرات به میوه باشد (Garcia-Garizabal *et al.*, 2011). به‌طور کلی، افزایش میزان مواد جامد محلول در گیاهان

تحت تنش آبی، روشی است که گیاهان برای تنظیم اسمزی و مقاومت در برابر تنش استفاده می‌کنند (Giné- Bordonaba and Terry, 2016).

گزارش‌های مختلفی مبنی بر اثر اسیدآمینو ال-سیستئین بر کاهش یا افزایش محتوای مواد جامد محلول دارد. مطابق پژوهش حاضر، کاربرد ال-سیستئین در میوه چشالو (Longan) (*Dimocarpus longan L.*) به‌طور قابل توجهی محتوای مواد جامد محلول را افزایش داد (Li et al., 2018). استفاده از نانو ذرات پوشش داده شده با سیستئین در کشت هیدروپونیک توت‌فرنگی با کاهش تعرق و تنفس سبب افزایش در میزان مواد جامد محلول میوه گردید. اسیدهای آمینه با کاهش واکنش‌های اکسیداتیو و تأخیر پیری از تغییرات بیش از حد و کاهش مواد جامد محلول در میوه جلوگیری می‌کنند (Shu et al., 2020).

اسید قابل تیتراسیون

بر اساس نتایج، تیمار آبیاری تأثیر معنی‌داری بر میزان اسید قابل تیتراسیون میوه نشان نداد ولی تیمار محلول-پاشی و اثر متقابل تیمار محلول‌پاشی و آبیاری در سطح یک درصد اختلاف معنی‌داری نشان داد (جدول ۲). با توجه به نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل، بیشترین میزان اسید قابل تیتراسیون (۳/۰۹ و ۳/۰۸ درصد) به‌ترتیب با کاربرد ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات‌پتاسیم در شرایط آبیاری ۱۰۰ درصد و کاربرد ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات‌پتاسیم در شرایط کم‌آبی ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه به‌دست‌آمد و کمترین مقدار آن در شرایط آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی در تیمار شاهد مشاهده شد (شکل ۳).



شکل ۳. اثر سیلیکات‌پتاسیم و اسید آمینه ال-سیستئین بر میزان اسید قابل تیتراسیون میوه فیسالیس در شرایط تنش کم‌آبی. حروف مشابه نشان‌دهنده عدم معنی‌داری در سطح احتمال خطای ۵ درصد است.

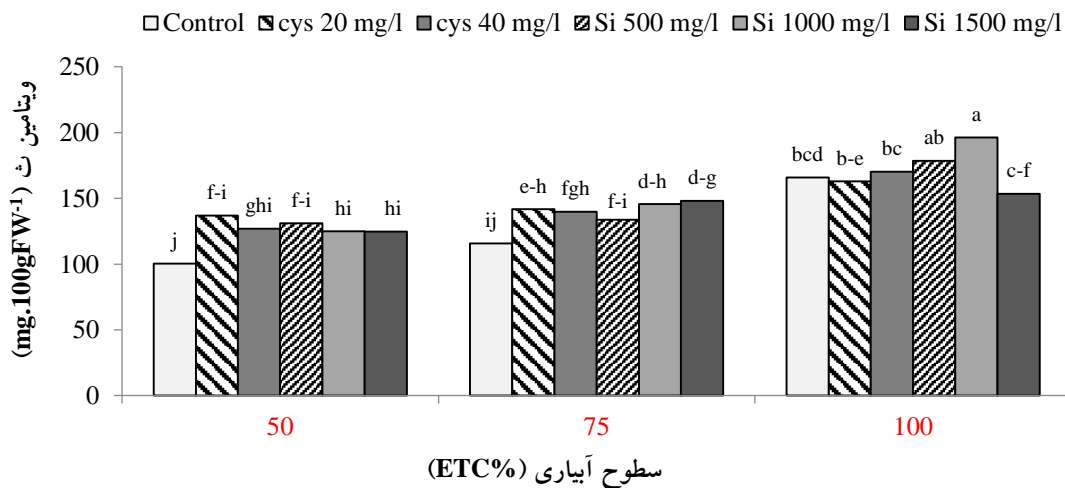
میزان اسید قابل تیتراسیون یکی از ویژگی‌های مهمی است که به‌طور قابل توجهی بر طعم و همچنین مشخصات تغذیه‌ای میوه تأثیر می‌گذارد (Ali et al., 2016). گزارش‌های متعددی مبنی بر اثرات مثبت یا منفی تنش آبی بر میزان اسید قابل تیتراسیون وجود دارد. میزان اسید قابل تیتراسیون در میوه به‌طور مستقیم با میزان اسیدهای آلی

مجله فرایند و کارکرد گیاهی

مرتبط است و کاهش اسیدپتیکه در نتیجه تغییرات متابولیکی در میوه به دلیل استفاده از اسیدهای آلی در فرایند تنفس می باشد (Gol et al., 2013). در پژوهش حاضر کاربرد سیلیکات پتاسیم و اسید آمینه سیستین سبب حفظ و افزایش اسید قابل تیتراسیون در میوه فیسالیس گردید که می تواند به کاهش تنفس و حفظ نسبت کربن به نیتروژن نسبت داده شود. کاربرد سیلیس در طی تنش کم آبی در گوجه فرنگی منجر به حفظ محتوای اسیدها در میوه گردید (Barzegar et al., 2022).

ویتامین ث

اعمال تنش کم آبی به طور معنی داری ویتامین ث میوه فیسالیس را کاهش داد و کاربرد سیلیکات پتاسیم و اسید آمینه سیستین باعث افزایش مقدار ویتامین ث شده و اثرات مضر تنش کم آبی را کاهش داد (جدول ۲ و شکل ۴). نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده ها نشان داد که بیشترین مقدار ویتامین ث (۱۹۶/۳ میلی گرم بر ۱۰۰ گرم وزن تر) در میوه گیاهان تیمار شده با سیلیکات پتاسیم ۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر تحت شرایط آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی و کمترین مقدار آن (۱۲۴/۸ میلی گرم بر ۱۰۰ گرم وزن تر) در تیمار شاهد تحت شرایط آبیاری ۵۰ درصد نیاز آبی حاصل شد (شکل ۴).



شکل ۴. اثر سیلیکات پتاسیم و اسید آمینه ال-سیستین بر میزان ویتامین ث میوه فیسالیس در شرایط تنش کم آبی. حروف مشابه نشان دهنده عدم معنی داری در سطح احتمال خطای ۵ درصد است.

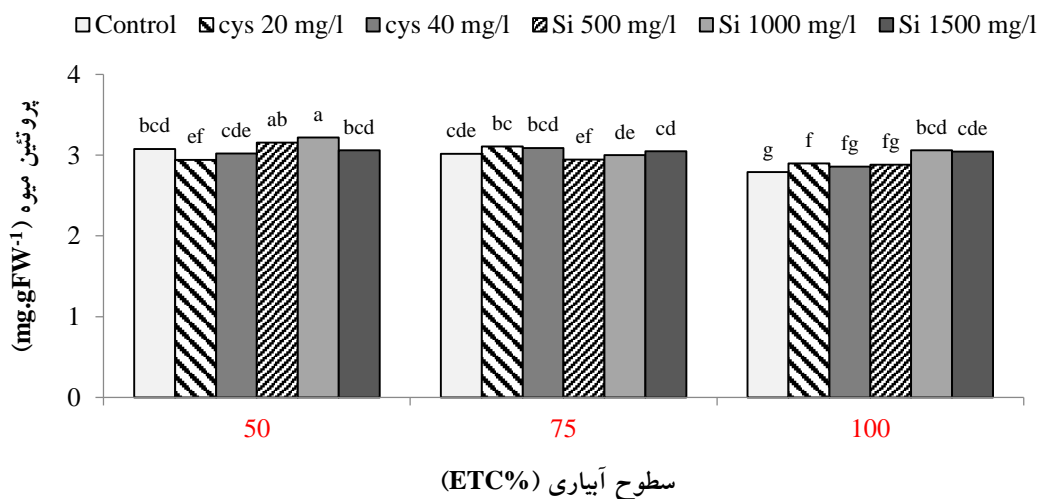
ویتامین ث، به عنوان یک آنتی اکسیدان محلول در آب سبب حذف رادیکال های آزاد اکسیژن جهت محافظت از سلول های گیاهی در برابر آسیب اکسیداتیو می شود (Beltagi, 2008). تحقیقات پیشین تایید کرد که ویتامین ث می تواند متابولیسم دفاعی آنتی اکسیدانی را تحت تنش های شوری و کم آبی تنظیم کند (Shafiq et al., 2014). با توجه به اینکه مسیر سنتز ویتامین ث از D-گلوکز، آغاز می شود، کاهش میزان ویتامین ث ممکن است به کاهش سطح سنتز D-گلوکز نسبت داده شود که در طول دوره تنش اتفاق می افتد که با مطالعات انجام شده در خرزهره نیز همخوانی دارد (Sat Pal Sharma et al., 2014). همچنین در پژوهش انجام شده در گوجه فرنگی، تنش کم آبی سبب کاهش در میزان

مجله فرایند و کارکرد گیاهی

ویتامین ث میوه گردید و محلول پاشی سیلیس با کاهش تنفس و مصرف اسیدهای آلی، سبب حفظ محتوای ویتامین ث گردید (Barzegar Hafshejani *et al.*, 2022).

پروتئین میوه

پروتئین میوه فیسالیس با اعمال تنش کم آبی به طور معنی داری افزایش یافت، به طوریکه با افزایش شدت تنش کم آبی از ۱۰۰ به ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه، افزایش ۵/۳۶ درصدی در میزان پروتئین میوه مشاهده شد. همچنین کاربرد سیلیکات پتاسیم در سطوح ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ میلی گرم در لیتر سبب افزایش معنی داری در میزان پروتئین میوه نسبت به تیمار شاهد گردید (جدول ۲). طبق نتایج مقایسه میانگین داده‌ها، بیشترین مقدار پروتئین میوه (۳/۲۲ میلی-گرم بر گرم وزن تر) در تیمار ۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر سیلیکات پتاسیم در شرایط آبیاری ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه، با ۱۵/۴۱ درصد افزایش نسبت به تیمار شاهد تحت شرایط آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه حاصل شد (شکل ۵).



شکل ۵. اثر سیلیکات پتاسیم و اسید آمینه ال-سیستئین بر میزان پروتئین میوه فیسالیس در شرایط تنش کم آبی. حروف مشابه نشان‌دهنده عدم معنی داری در سطح احتمال خطای ۵ درصد است.

تنظیم اسمزی یک پاسخ تطبیقی و یک مکانیسم فیزیولوژیکی مهم گیاهان برای تحمل به کم آبی می‌باشد (Zhang *et al.*, 2017). در شرایط تنش کم آبی، سلول‌ها با تجمع تنظیم‌کننده‌های اسمزی نظیر پرولین، قندهای محلول و پروتئین محلول برای حفظ فعالیت‌های فیزیولوژیکی طبیعی گیاهان، فشار تورژسانس را حفظ می‌کنند (Liu and Wei, 2021). افزایش در میزان پروتئین با اعمال تنش کم آبی به دلیل تولید پروتئین‌های جدید و یا افزایش سطح پروتئین‌های مرتبط با سازگاری و تطابق گیاه با شرایط تنش می‌باشد که می‌تواند به آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی اشاره کرد (Wang *et al.*, 2023). در این رابطه گزارش شده است که کاربرد سیلیس باعث افزایش محتوای پروتئین محلول، اسید آمینه آزاد و در نهایت افزایش تولید محصول می‌گردد (Li *et al.*, 2012). سیلیکون با افزایش رنگیزه‌های فتوسنتزی، افزایش فعالیت آنزیم رویسکو و ظرفیت فتوسنتزی، کاهش تنش اکسیداتیو و حفاظت ماکرومولکول‌هایی نظیر

پروتئین‌ها و غشای کلروپلاستی و غشای سلولی باعث افزایش فتوسنتز شده و در نتیجه میزان قندهای محلول و پروتئین موجود در گیاهان را افزایش می‌دهد (Amin et al., 2018).

تعداد میوه در بوته، درصد ماده خشک و عملکرد میوه

تعداد میوه در بوته با اعمال تنش کم‌آبی به‌طور معنی‌داری ($P \leq 0/01$) کاهش یافت و تیمارهای سیلیکات-پتاسیم و سیستین سبب افزایش قابل توجهی در تعداد میوه شد (جدول ۳). با توجه به نتایج اثرات متقابل آبیاری و تیمار محلول‌پاشی، بیشترین تعداد میوه با کاربرد ۴۰ میلی‌گرم در لیتر اسیدآمینو-ال-سیستین تحت شرایط آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی حاصل شد (شکل ۶A).

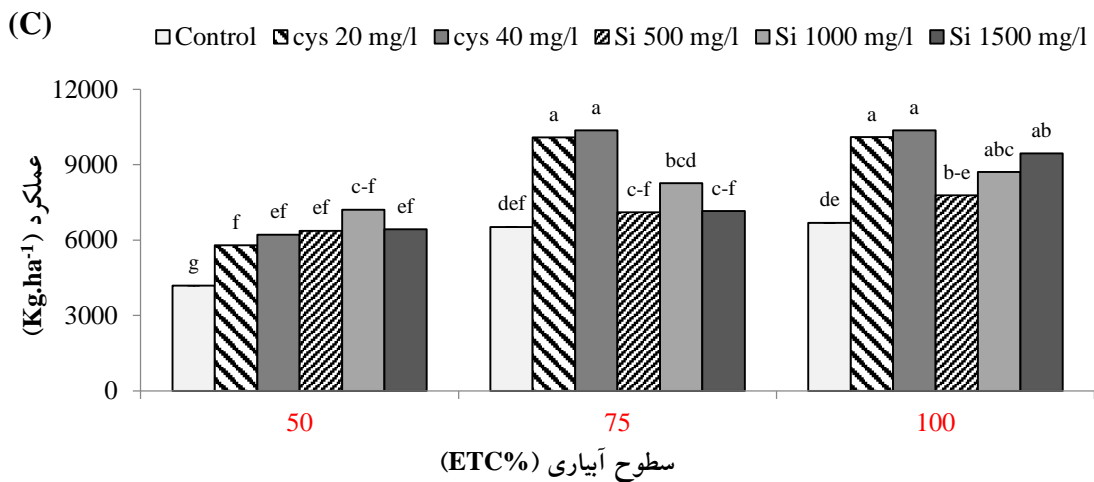
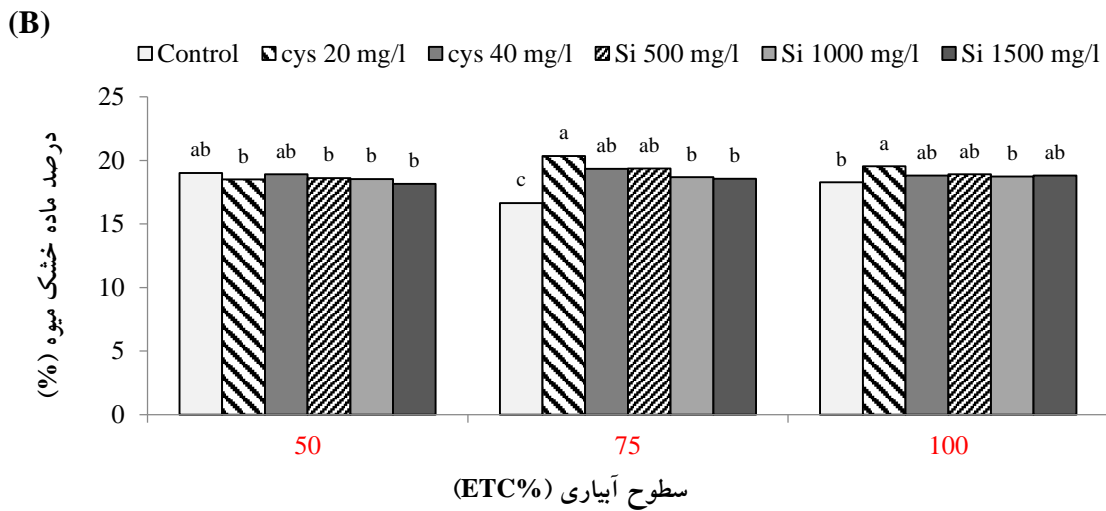
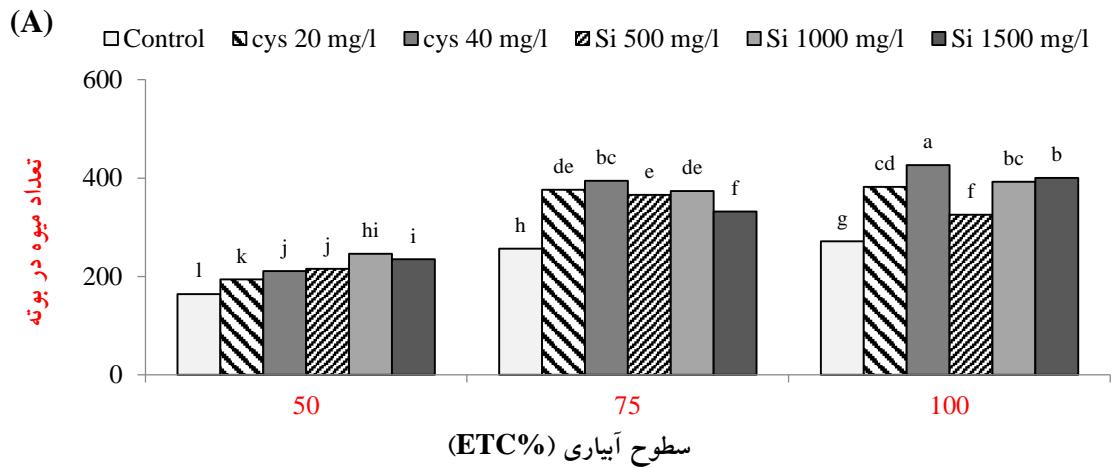
اعمال تنش کم‌آبی تاثیر معنی‌داری بر میزان ماده خشک میوه نداشت. درحالی‌که محلول‌پاشی تیمارهای سیلیکات‌پتاسیم و اسیدآمینو سیستین منجر به تجمع بیشتر ماده خشک در میوه فیسالیس گردید. با توجه به نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل، بیشترین درصد ماده خشک میوه (۲۰/۳۵ درصد) با کاربرد ۲۰ میلی‌گرم در لیتر اسیدآمینو سیستین و کمترین مقدار آن (۱۶/۶۴ درصد) در تیمار شاهد در شرایط آبیاری ۷۵ درصد به‌دست آمد (شکل ۶B).

با اعمال تنش کم‌آبی عملکرد میوه نیز به‌طور معنی‌داری کاهش یافت و کاربرد تیمارهای سیلیکات‌پتاسیم و اسیدآمینو سیستین سبب تعدیل اثرات تنش کم‌آبی شده و عملکرد میوه را نسبت به تیمار شاهد به‌طور معنی‌داری افزایش دادند (جدول ۳ و شکل ۶). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد، با کاربرد اسیدآمینو سیستین ۴۰ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر به‌ترتیب تحت شرایط آبیاری ۱۰۰ و ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه بیشترین عملکرد میوه به‌دست آمد که در مقایسه با گیاهان شاهد تحت آبیاری ۱۰۰ درصد منجر به افزایش ۳۵/۵ درصد در عملکرد میوه گردید (شکل ۶C).

جدول ۳. تجزیه واریانس اثر سیلیکات‌پتاسیم و اسیدآمینو-ال-سیستین بر عملکرد میوه و کارایی مصرف آب فیسالیس در شرایط تنش کم‌آبی

| منابع تغییرات | درجه آزادی | میانگین مربعات | | |
|------------------|------------|----------------|----------------------|--------------|
| | | تعداد میوه | درصد وزن خشک میوه | عملکرد میوه |
| تکرار | ۲ | ۳۶/۷۲ | ۰/۳۵۰۹ | ۲۳۶۹۹۸/۶ |
| آبیاری | ۲ | ۱۳۱۱۹۸/۱۶** | ۰/۲۶۴۴ ^{ns} | ۳۴۰۳۷۳۱۹/۹** |
| خطای کرت اصلی | ۴ | ۳۳/۲۲ | ۱/۹۴۸۹ | ۱۶۲۳۳۹۶ |
| تیمار (Cys و Si) | ۵ | ۱۵۲۱۸/۰۴** | ۲/۳۲۱۸* | ۱۱۵۱۱۶۴۲/۳** |
| آبیاری × تیمار | ۱۰ | ۲۳۵۴/۶۷** | ۱/۵۴۶* | ۲۸۰۱۴۴۰/۱** |
| خطای کرت فرعی | ۳۰ | ۸۱/۵۴ | ۰/۶۴۷۷ | ۷۷۴۰۵۹/۱ |
| ضریب تغییرات (%) | - | ۲/۹۲ | ۴/۲۹ | ۱۱/۵۵ |

ns, * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار، معنی‌دار در سطح ۵٪ و ۱٪.

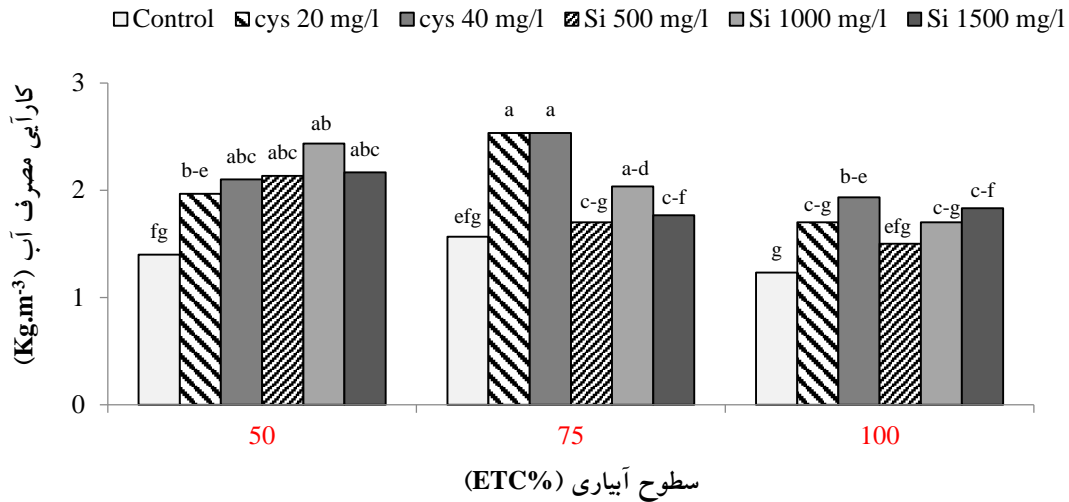


شکل ۶. اثر سیلیکات پتاسیم و اسید آمینه ال-سیستین بر تعداد میوه در بوته (A)، درصد ماده خشک (B) و عملکرد میوه (C) میوه فیسالیس در شرایط تنش کم آبی. حروف مشابه نشان دهنده عدم معنی داری در سطح احتمال خطای ۵ درصد است.

افزایش زیست توده گیاهی به طور مستقیم با راندمان فتوسنتزی و جذب در گیاهان مرتبط است، که به نوبه خود با رنگدانه‌های فتوسنتزی و روابط آبی گیاه مرتبط است (Barutçular *et al.*, 2016). در شرایط کمبود آب به دلیل بسته شدن روزنه‌ها و تخریب مراکز واکنش فتوسنتزی، کاهش قابل توجهی در میزان فتوسنتز و تجمع زیست توده گیاهی مشاهده می‌شود (Ibrahim *et al.*, 2016). علاوه بر این، تنش کم‌آبی باعث جذب، توزیع مجدد و انتقال مواد مغذی می‌شود که منجر به کاهش رشد، محتوای ماده خشک و عملکرد می‌شود (Gaafar *et al.*, 2022). این کاهش رشد و عملکرد می‌تواند به دلیل کاهش جذب عناصر مغذی پرمصرف و کم‌مصرف باشد که منجر به کاهش سطح برگ و محتوای کلروفیل و در نتیجه فتوسنتز می‌شود (Atilgan *et al.*, 2022). همچنین تعداد میوه در بوته از مهم‌ترین اجزای موثر در عملکرد گیاه فیسالیس می‌باشد. کاهش تعداد میوه در بوته ممکن است تحت اثر تنش کم‌آبی در زمان گلدهی و گرده‌افشانی باشد که ممکن است باعث خشک شدن دانه گرده و کلاله مادگی در اثر کم‌آبی و به دنبال آن عدم تلقیح مناسب و سقط گل باشد، که این عوامل می‌تواند باعث کاهش درصد تشکیل میوه شود. تنش آبی طی دوره گلدهی با محدود کردن توزیع مواد غذایی، کاهش درصد ماده خشک و تاثیر بر تعداد گل و به تبع آن تعداد میوه و طی دوره میوه‌دهی با اثر بر وزن میوه، عملکرد را تحت تاثیر قرار می‌دهد (Garcia-Garizabal *et al.*, 2011). سیلیکون با تنظیم پاسخ‌های فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و مولکولی، موجب بهبود مقاومت گیاه در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی شده و در بسیاری از فرآیندهای گیاهی از جمله واکنش‌های اسمزی، فرآیندهای متابولیکی، فیزیولوژی روزنه و فیتوهورمون‌ها دخیل بوده و عملکرد و کیفیت گیاهان را تحت شرایط تنش بهبود می‌بخشد (Ahire *et al.*, 2021). گزارش شده است که افزودن سیلیس در محلول کشت می‌تواند جذب آب توسط ریشه‌ها را در شرایط تنش آبی از طریق تجمع قندهای محلول و اسیدهای آمینه افزایش دهد (Ming *et al.*, 2012). Sarojnee و همکاران (۲۰۰۹) گزارش کردند که کاربرد اسیدهای آمینه در گیاه فلفل بطور معنی‌داری معنی‌داری ارتفاع گیاه، تعداد میوه، طول و قطر میوه، درصد ماده خشک میوه و عملکرد محصول را نسبت به تیمار شاهد افزایش داد.

کارایی مصرف آب (WUE)

اعمال تنش کم‌آبی، کارایی مصرف آب به طور معنی‌داری افزایش داد ولی با افزایش شدت تنش از مقدار آن کاسته شد به طوری که بیشترین کارایی مصرف آب در تیمار آبیاری ۷۵ درصد نیاز آبی حاصل شد. همچنین محلول-پاشی تیمارهای سیلیکات پتاسیم و اسید آمینه ال-سیستین سبب افزایش کارایی مصرف آب گردید (جدول ۳ و شکل ۷). نتایج نشان داد که بیشترین کارایی مصرف آب (۲/۵۳ و ۲/۴۳ کیلوگرم در مترمکعب) به ترتیب در گیاهان تیمار شده با ۲۰ و ۴۰ میلی‌گرم در لیتر اسید آمینه سیستین تحت شرایط آبیاری ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه و تیمار ۱۰۰۰ میلی-گرم در لیتر سیلیکات پتاسیم در شرایط آبیاری ۵۰ درصد نیاز آبی حاصل شد و کمترین مقدار آن در تیمار شاهد تحت شرایط آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه مشاهده شد (شکل ۷).



شکل ۷. اثر سیلیکات پتاسیم و اسید آمینه ال-سیستین بر کارایی مصرف آب میوه فیسالیس در شرایط تنش کم آبی. حروف مشابه نشان دهنده عدم معنی داری در سطح احتمال خطای ۵ درصد است.

یکی از مهم‌ترین عوامل موثر در برنامه‌ریزی آبیاری، کارایی مصرف آب یا مقدار ماده خشک تولیدی به ازای واحد آب مصرفی است. در شرایط نزدیک به تنش کم آبی، گیاه در مقایسه با شرایط آبی بهینه، نسبت به میزان آب مصرف شده محصول بیشتری تولید می‌کند (Ghaffari et al., 2020). در این پژوهش اعمال تنش کم آبی ملایم (۷۵ درصد)، کارایی مصرف آب را بهبود بخشید و تنش آبی شدید (۵۰ درصد) کارایی مصرف آب را کاهش داد که با نتایج به دست آمده در گوجه‌فرنگی (Kuscu et al., 2014) مطابقت دارد. این کاهش را می‌توان چنین توجیه کرد که در سطح تنش کم آبی ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه، با کاهش میزان آب مصرفی عملکرد با نسبت کمتری کاهش یافته است. بنابراین کارایی مصرف آب نسبت به تنش شدید افزایش بیشتری داشته است. به نظر می‌رسد کاربرد سیلیکات پتاسیم و اسید آمینه ال-سیستین در شرایط آبیاری مطلوب و تنش، از طریق افزایش رشد ریشه و جذب عناصر غذایی و در نتیجه ارتقای توان فتوسنتزی گیاه، عملکرد میوه و در نهایت کارایی مصرف آب را به طور معنی داری افزایش دادند (Araújo et al., 2019). تیمار اسید آمینه منجر به بسته شدن روزنه‌ها و کاهش تبخیر و تعرق گیاه و افزایش محتوای نسبی آب برگ شده و در نتیجه کارایی مصرف آب را در شرایط تنش افزایش می‌دهد (Zotarelli et al., 2009). بر اساس مطالعات استفاده از سیلیکون نیز سبب کاهش اثرات تنش آبی می‌گردد که این به پلیمریزاسیون آن پس از جذب و رسوب در دیواره‌های سلولی ریشه، ساقه و برگ نسبت داده می‌شود و یک لایه دوگانه از سیلیس-کوتیکول و سیلیس-سلولز را تشکیل می‌دهد. بنابراین، افزایش مقاومت و سختی دیواره‌های سلولی، کاهش تعرق و افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی آنزیمی مرتبط با مکانیسم‌های دفاعی گیاه وجود دارد (Flores et al., 2019). در شرایط مزرعه، سیلیکون از طریق حفظ محتوای آب در سلول‌ها، افزایش عملکرد فتوسنتزی و بهبود کارایی مصرف آب، سبب افزایش تحمل به شرایط کم آبی در میوه گوجه‌فرنگی گردید (Morales et al., 2020).

نتیجه‌گیری کلی

مجله فرایند و کارکرد گیاهی

با توجه به نتایج حاصل از این آزمایش می‌توان بیان کرد که تنش کم‌آبی با کاهش تعداد میوه در بوته، عملکرد میوه را کاهش داد، بطوری‌که تنش کم‌آبی ۵۰ درصد منجر به کاهش ۳۷/۳ درصد عملکرد میوه در مقایسه با آبیاری ۱۰۰ درصد شد. کاربرد سیلیکات پتاسیم یا اسید آمینه ال-سیستین در شرایط آبیاری ۱۰۰ درصد و تنش کم‌آبی، عملکرد میوه فیسالیس را افزایش دادند به طوری‌که با محلول‌پاشی اسید آمینه سیستین ۲۰ و ۴۰ میلی‌گرم در لیتر در شرایط کم‌آبی ۷۵ درصد در مقایسه با گیاهان شاهد تحت آبیاری ۱۰۰ درصد، با کاهش ۲۵ درصدی مصرف آب، عملکرد میوه ۳۵/۵ درصد افزایش یافت و همچنین در شرایط کم‌آبی ۵۰ درصد، با محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر ضمن کاهش ۵۰ درصدی مصرف آب، عملکرد میوه ۷/۷ درصد در مقایسه با گیاهان شاهد تحت آبیاری ۱۰۰ درصد افزایش نشان داد، که منجر به افزایش کارایی مصرف آب شدند. کاربرد سیلیکات پتاسیم بخصوص در غلظت ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر و اسید آمینه سیستین با افزایش محتوای کاروتنوئید میوه، اسید قابل تیتراسیون، ویتامین ث و پروتئین میوه، کیفیت میوه را بهبود بخشیدند. بنابراین می‌توان در راستای افزایش عملکرد و کیفیت میوه و کاهش اثرات منفی تنش کم‌آبی، تیمارهای کودی سیلیکات پتاسیم یا اسید آمینه ال-سیستین را پیشنهاد کرد.

- وزیری، ژاله، سلامت، علیرضا، انصاری، محمدرضا، مسچی، محمود، حیدری، نادر، و دهقانی سانج، حسین (۱۳۸۷). تبخیر- تعرق گیاهان (دستورالعمل محاسبه آب مورد نیاز گیاهان). ترجمه انتشارات کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، تهران.
- Ahire, M. L., Mundada, P. S., Nikam, T. D., Bapat, V. A., & Penna, S. (2021). Multifaceted roles of silicon in mitigating environmental stresses in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 169, 291-310. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.11.010>
- Ali, S., Khan, A. S., & Malik, A.U. (2016). Postharvest L-cysteine application delayed pericarp browning, suppressed lipid peroxidation and maintained antioxidative activities of litchi fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 121, 135-142. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2016.07.015>
- Amin, M., Ahmad, R., Ali, A., Hussain, I., Mahmood, R., Aslam, M., & Lee, D. J. (2018). Influence of silicon fertilization on maize performance under limited water supply. *Silicon*, 10(2), 177-183. <https://doi.org/10.1007/s12633-015-9372-x>
- AOAC. (2000). Official method of analysis of the association of official analytical chemists. *Washington D.C.* 12, 377-378.
- Araújo, A. L. G., Almeida, A. M. d., Guimarães, J. d. J., Cantuário, F. S. d., Salomão, L. C., Curvêlo, C. R. d. S., Cantuário, A. R., Luz, J. M. Q., & Pereira, A. I. A. (2019). Potassium silicate, against water stress, in sweet corn plant growth traits. *Journal of Agricultural Sciences*, 11(5), 172. <https://repositorio.ifgoiano.edu.br/handle/prefix/441>
- Arnon, D. (1949). Copper enzymes isolated chloroplasts, polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, 24, 1-15. [10.1104/pp.24.1.1](https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1)
- Asgharipour, M., & Mosapour, H. (2016). A foliar application silicon enhances drought tolerance in fennel. *Journal of animal and plant Sciences*, 26, 1056–1062.
- Atilgan, A., Rolbiecki, R., Saltuk, B., Jagosz, B., Arslan, F., Erdal, I., & Aktas, H. (2022). Deficit Irrigation Stabilizes Fruit Yield and Alters Leaf Macro and Micronutrient Concentration in Tomato Cultivation in Greenhouses: A Case Study in Turkey. *Agronomy*, 12(12), 2950. <https://doi.org/10.3390/agronomy12122950>
- Barbosa, E. A. A., Ricardo Antonio, A., Ângela L., Isabela, L. P., & André Belmont, P. (2019). Foliar gas exchange, fruit quality and water use efficiency of cape Gooseberry under different irrigation depths and mulching at greenhouse conditions. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 41(4), 1-11. <https://doi.org/10.1590/0100-29452019001>
- Barutçular, C., Dizlek, H., El-Sabagh, A., Sahin, T., EL-Sabagh, M., & Islam, M. S. (2016). Nutritional quality of maize in response to drought stress during grain-filling stages in Mediterranean climate condition. *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences*, 4, 644–652. DOI: [http://dx.doi.org/10.18006/2016.4\(Issue6\).644.652](http://dx.doi.org/10.18006/2016.4(Issue6).644.652)
- Barzegar Hafshejani, Z., Ghasemnezhad, M., Olfati, J., Khaledian, M. R., & Khalighi A. (2022). The influence of silica upon quantitative, qualitative, and biochemical traits of tomato under water stress. *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus*, 21(5), 123–138. <https://doi.org/10.24326/asphc.2022.5.11>
- Basu, S., Ramegowda, V., Kumar, A., & Pereira, A. (2016). Plant adaptation to drought stress. *F1000 Research*, 5, 1-10. <https://doi.org/10.12688/f1000research.7678.1>
- Batool, Tahira., Shafaqat, Ali., Mahmoud, F., Seleiman, N. H. N., Aamir A., Khurshid A., Muhammad, A., Muhammad, R., Muhammad, R. S., Majed, A., Ibrahim, A., & Mubushar, M. (2020). Plant growth promoting rhizobacteria alleviates drought stress in potato in response to suppressive oxidative stress and antioxidant enzymes activities. *Scientific Reports*, 10, 1-20. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-73489-z>
- Beltagi, M. (2008). Exogenous ascorbic acid (Vitamin C) induced anabolic changes for salt tolerance in chick pea (*Cicer arietinum* L.) plants. *African Journal of Plant Science*, 2, 118– 123.

- Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72(1-2), 248-254. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3)
- Daneshpajouh, P., Ghasemi, A., Nouree, M., & Barzegar, R. (2018). The Effect of Partial Root-Zone Drying and Zeolite on Water Use Efficiency and Physiological Characteristics of Sweet Pepper. *Journal of Water and Soil (Agricultural Science and Industry)*, 32(4), 675-690. <https://doi.org/10.22067/jsw.v32i4.69640>
- El-Saadony, F. M. A., Mazrou, Y. S. A., Khalaf, A. E. A., El-Sherif, A. M. A., Osman, H. S., Hafez, E. M., & Eid, M. A. M. (2021). Utilization efficiency of growth regulators in wheat under drought stress and sandy soil conditions. *Agronomy*, 11(9), 1760. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091760>
- Flores, R. A., Souza Junior, J. P., Santos, Á. S., Cruz, F. J. R., Campos, C. N. S., Júnior, G. B. S., & De Prado, R. M. (2019). Importância do silício na bioquímica e fisiologia das plantas. In *Nutrição e Adubação de Grandes Culturas Na Região Do Cerrado*; Flores, R.A., Cunha, P.P., Marchão, R.L., Moraes, M.F., Eds.; *Gráfica UFG: Goiânia, Brazil*, 79–98.
- Gaafar, R., Seyam, M., & El-Shanshory, A. (2022). Expression patterns of drought-related miRNAs in Chickpea (*Cicer arietinum* L.) under drought stress. *Egyptian Journal of Botany*, 62(1), 227-240. <https://dx.doi.org/10.21608/ejbo.2021.96667.1790>
- Garcia, A. L., Madrid, R., Gimeno, V., Rodríguez Ortega, W. M., Nicolas, N., & García-Sánchez. F. (2011). The effects of amino acids fertilization incorporated to the nutrient solution on mineral composition and growth in tomato seedlings. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 9(3), 852-861. <https://doi.org/10.5424/sjar/20110903-399-10>
- Garcia-Garizabal, I., Causape, J., & Abrahao, R. (2011). Application of the irrigation land environmental evaluation tool for flood irrigation management and evaluation of water use. *Catena Journal*, 87(2), 260-267. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.06.010>
- Genisel, M.; Erdal, S., & Kizilkaya, M. (2015). The mitigating effect of cysteine on growth inhibition in salt-stressed barley seeds is related to its own reducing capacity rather than its effects on antioxidant system. *Plant Growth Regulation*, 75, 187–197. <https://doi.org/10.1007/s10725-014-9943-7>
- Ghaffari, M., Andarkhor, S. A., Homayonifar, M., Kalantar Ahmadi, S. A., Shariati, F., Jamali, H., & Rahmanpour, S. (2020). Agronomic attributes and stability of exotic sunflower hybrids in Iran. *Helia*, 43(72), 1-15. <https://doi.org/10.1515/helia-2020-0004>
- Giné-Bordonaba, J., & Terry, L. A. (2016). Effect of deficit irrigation and methyl jasmonate application on the composition of strawberry (*Fragaria × ananassa*) fruit and leaves, *Scientia Horticulturae*, 199, 63–70. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.12.026>
- Gol, B. N., Patel, R., Rao, P., & Ramana, T. V. (2013). Improvement of quality and shelf life of strawberries with edible coatings enriched with chitosan. *Postharvest Biology and Technology*, 85, 185-195. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.06.008>
- Gong, H. J., Chen, K. M., Zhao, Z. G., Chen, G. C., & Zhou, W. J. (2008). Effects of silicon on defense of wheat against oxidative stress under drought at different developmental stages. *Plant Biology*, 52, 592–596. <https://doi.org/10.1007/s10535-008-0118-0>
- Ibrahim, F. M. F., Faisal, A., & Shehata, S. A. (2016). Calcium Chloride Alleviates Water Stress in Sunflower Plants Through Modifying Some Physio-Biochemical Parameters. *American- Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences*, 16(4), 677-693. <https://doi.org/10.5829/idosi.aejaes.2016.16.4.12907>
- Kapoor, D., Bhardwaj, S., Landi, M., Sharma, A., Ramakrishnan, M., & Sharma, A. (2020). The impact of drought in plant metabolism: how to exploit tolerance mechanisms to increase crop production. *Applied Sciences*, 10(16), 5692. <https://doi.org/10.3390/app10165692>
- Keshavarzpour, F., & Rashidi, M. (2011). Response of crop yield and yield components of cantaloupe to drought stress. *Washington Academy of Science Journal*, 3, 382-385.

- Kuscu, H., Turhan A., & Demir A.O. (2014). The response of processing tomato to deficit irrigation at various phenological stages in a sub-humid environment. *Agricultural Water Management*, 133, 92–103. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.11.008>
- Li, P., Song, A., Li, Z., Fan, F., & Liang, Y. (2012). Silicon ameliorates manganese toxicity by regulating manganese transport and antioxidant reactions in rice (*Oryza sativa* L.). *Plant and Soil*, 354(1-2), 407-419. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-1076-4>
- Li, T., Wu, Q., Zhou, Y., Yun, Z., Duan, X., & Jiang, Y. (2018). L-Cysteine hydrochloride delays senescence of harvested longan fruit in relation to modification of redox status. *Postharvest Biology and Technology*, 143, 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.04.011>
- Liu, Y., & Wei, X. (2021). Dark septate endophyte improves the drought-stress resistance of *Ormosia hosiei* seedlings by altering leaf morphology and photosynthetic characteristics. *Plant Ecology*, 222, 761–771. <https://doi.org/10.1007/s11258-021-01135-3>
- Lobato, A. K. S., Coimbra, G. K., Neto, M. A. M., Costa, R. C. L., Filho, B. G. S., Neto, C. F. O., Luz, L. M., Barreto, A. G. T., Pereira, B. W. F., Alves, G. A. R., Monteiro, B. S., & Marochio, C. A. (2009). Protective action of silicon on water relations and photosynthetic pigments in pepper plants induced to water deficit. *Research Journal of Biological Sciences*, 4, 617–623.
- Ming, D. F., Pei, Z. F., Naeem, M. S., Gong, H. J., & Zhou, W. J. (2012). Silicon alleviates PEG-induced water-deficit stress in upland rice seedlings by enhancing osmotic adjustment. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 198, 14–26. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2011.00486.x>
- Moraes, D. H. M., Mesquita, M., Bueno, A. M., Flores, R. A., Oliveira, H. F. E., Lima, F. S. R., Prado, R. M., & Battisti, R. (2020). Combined Effects of Induced Water Deficit and Foliar Application of Silicon on the Gas Exchange of Tomatoes for Processing. *Agronomy*, 10, 1-12. <https://doi.org/10.3390/agronomy10111715>
- Pavlovic, J., Kostic, L., Bosnic, P., Kirkby, E. A., & Nokolic, M. (2021). Interactions of silicon with essential and beneficial elements in plants. *Frontiers in Plant Science*, 12, 697592. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.697592>
- Pourmohamad, Y., Alizadeh, A., Mousavi Baygi, M., Gebremichael, M., Ziaei, A., & Bannayan, N. (2019). Optimizing cropping area by proposing a combined water-energy productivity function for Neyshabur Basin, Iran. *Agricultural Water Management*, 217, 131-140. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.02.040>
- Raziq, A., Wang, Y., Mohi Ud Din, A., Sun, J., Shu, S., & Guo, S. A. (2022). Comprehensive evaluation of salt tolerance in tomato (var. Ailsa Craig): Responses of physiological and transcriptional changes in RBOH's and ABA biosynthesis and signalling genes. *International Journal of Molecular Sciences*, 23, 1603. <https://doi.org/10.3390/ijms23031603>
- Rezaei Nejad, A., & Ismaili, A. (2013). Changes in growth, essential oil yield and composition of geranium (*Pelargonium graveolens* L.) as affected by growing media. *Journal of Science Food Agriculture*, 94, 905–910. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6334>
- Rugeles Reyes, S. M., Gabriel Roveda H., Domingos da C. F. J., Arthur B. C. F., & Liz Patricia, M. F. (2019). Physiological response of *Physalis peruviana* L. seedlings inoculated with *Funneliformis mosseae* under drought stress. *Revista de Ciências Agrárias*, 42(1), 175-183. <https://doi.org/10.19084/RCA18140>
- Sahebi, M., Hanafi, M.M., SitiNor Akmar, A., Rafii, M.Y., Azizi, P., Tengoua, F., Nurul Mayzaitul Azwa, J., & Shabanimofrad, M. (2015). Importance of silicon and mechanisms of biosilica formation in plants. *BioMed Research International*. <https://doi.org/10.1155/2015/396010>
- Sarojnee, D. Y., Navindra, B., & Chandrabose, S. (2009). Effect of naturally occurring amino acid stimulants on the growth and yield of hot peppers (*Capsicum annum* L.). *Journal of Animal and Plant Sciences*, 5(1), 414-424. <http://www.biosciences.elewa.org/JAPS>
- Sat Pal Sharma, I., Daniel, D., Leskovara Kevin, A. M., Crosby, A. M. H., & Astrid Volderb, I. (2014). Root growth yield and fruit quality responses of reticulatus and inodorus melon (*Cucumis melo* L.) to

- deficit subsurface drip irrigation. *Agricultural Water Management*, 136, 75-85. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.01.008>
- Shafiq, S., Akram, N. A., Ashraf, M., & Arshad, A. (2014). Synergistic effects of drought and ascorbic acid on growth, mineral nutrients and oxidative defense system in canola (*Brassica napus* L.) plants. *Acta Physiologiae Plantarum*, 36, 1539–1553. <https://doi.org/10.1007/s11738-014-1530-z>
- Shao, G. C., Deng, S., Liu, N., Wang, M. H., & She, D. L. (2015). Fruit Quality and Yield of Tomato as Influenced by Rain Shelters and Deficit Irrigation. *Journal of Agriculture Science Technology*, 17, 691-704. <http://hdl.handle.net/123456789/4216>
- Sharma, A., Wang, J., Xu, D., Tao, S., Chong, S., Yan, D., Li, Z., Yuan, H., & Zheng, B. (2020). Melatonin regulates the functional components of photosynthesis, antioxidant system, gene expression, and metabolic pathways to induce drought resistance in grafted *Carya cathayensis* plants. *Science of The Total Environment*, 713, 136675. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136675>
- Shekari, G., & Javanmardi, J. (2017). Effects of foliar application pure amino acid and amino acid containing fertilizer on Broccoli (*Brassica oleracea* L. var. italica) Transplants. *Advances in Crop Science and Technology*, 5(3), 1-4. <https://doi.org/10.4172/2329-8863.1000280>
- Sholehah, D. N., Ermavitalini, D., Khasanah, M., Utami, E. S. W., & Purnobasuk, H. (2022). Effect of foliar nutrients application to the growth and yield of *Physalis peruviana* and *Physalis alkekengi*. *Earth and Environmental Science*, 978, 012003. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/978/1/012003>
- Shu, P., Min, D., Ai, W., Li, J., Zhou, J., Li, Z., Zhang, X., Shi, Z., Sun, Y., Jiang, Y., & Li, F. (2020). L-Arginine treatment attenuates postharvest decay and maintains quality of strawberry fruit by promoting nitric oxide synthase pathway. *Postharvest Biology and Technology*, 168, 111253. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111253>
- Singh, M. B., Kumar, P., Kundu, M., Samanta, D., & Segupta, S. (2022). Optimization of stage of gibberellin spray in Cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) for the improvement of yield and fruit quality under subtropical condition. *Emergent Life Science Research*, 8(2), 206-213. <https://doi.org/10.31783/elsr.2022.82206213>
- Sogvar, O., Razavi, F., Rabiei, V., & Gohari, G. (2020). Postharvest application of L-cysteine to prevent enzymatic browning of “Stanley” plum fruit during cold storage. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(10), 14788. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14788>
- Tripathi, D. K., Singh, S., Singh, V. P., Prasad, S. M., Dubey, N. K., & Chauhan, D. K. (2017). Silicon nanoparticles more effectively alleviated UV-B stress than silicon in wheat (*Triticum aestivum*) seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry*, 110, 70-81. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.06.026>
- Wang, X., Wu, G., Li, D., & Song, X. (2023). Moderate Nitrogen Deposition Alleviates Drought Stress of *Bretschneidera sinensis*. *Forests*, 14(1), 137. <https://doi.org/10.3390/f14010137>
- Zhang, R., Wu, J., Li, Q., Hänninen, H., Peng, C., Yao, H., Song, X., & Ying, Y. (2017). Nitrogen deposition enhances photosynthesis in Moso bamboo but increases susceptibility to other stress factors. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1975. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01975>
- Zhanga, H., Xionga, Y., Huang, G., Xua, X., & Huang, Q. (2017). Effects of water stress on processing tomatoes yield, quality and water use efficiency with plastic mulched drip irrigation in sandy soil of the Hetao Irrigation District. *Agricultural Water Management*, 179, 205–214. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.07.022>
- Zotarelli, L., Scholberg, J. M., Dukes, M. D., Munoz-Carpena, R., & Icerman, J. (2009). Tomato yield, biomass accumulation, root distribution and irrigation water use efficiency on a sandy soil, as affected by nitrogen rate and irrigation scheduling. *Agricultural Water Management*, 96(1), 23-34. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.06.007>

Effect of potassium silicate and L-cysteine on yield, water use efficiency and fruit quality of *Physalis (Physalis peruviana L.)* under water deficit conditions

Arezoo Khani¹, Taher Barzegar^{1*}, Jaefar Nikbakht²

1 - Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran

2 - Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran

Corresponding Author: Taher Barzegar, tbarzegar@znu.ac.ir

Abstract:

Nowadays, due to climate change and a decrease in rainfall, the production of agricultural products in many regions, especially arid and semi-arid regions, has faced problems. For this purpose, to study the effect of potassium silicate (Si) and L-cysteine (Cys) foliar spray on water use efficiency, fruit yield and quality of *Physalis (Physalis peruviana L.)* under water deficit conditions, a split-plot experiment based on a randomized complete block design with three replications was conducted in the Research field of the University of Zanjan during 2022. Experimental treatments consisted of three different irrigation levels (50, 75 and 100% ETc) as the main plot and a foliar spray of potassium silicate (0, 500, 1000 and 1500 mg L⁻¹) and L-cysteine amino (0, 20 and 40 mg L⁻¹) as a subplot. The results showed that water deficit stress increased total soluble solids (TSS), titratable acidity (TA) and protein contents, and decreased vitamin C content, fruit number and yield. Application of Si, especially at 1000 and 1500 mg l⁻¹ and Cys improved carotenoids, TSS, TA, vitamin C and fruit protein contents, and fruit yield under irrigation 100 ETc% and water deficit stress conditions. The highest fruit yield was obtained with the application of 20 and 40 mg L⁻¹ Cys under irrigation of 100 and 75 ETc%. Also, the highest value of WUE was observed in plants treated with 20 and 40 mg L⁻¹ Cys under deficit irrigation of 75 ETc% and 1000 mg L⁻¹ Si under deficit irrigation of 50 ETc%, respectively. Therefore, the application of 1000 mg L⁻¹ of potassium silicate and 40 mg L⁻¹ of cysteine is suggested to increase the quality and yield of the physalis under the irrigation 100 Etc% and water deficit stress conditions.

Keywords: Carotenoids, Fruit number, Total soluble solids, Vitamin C.