مجله علوم و فنون باغبانی ایران جلد ۲۵ شماره ۳ صفحه‌های ۳۰۳ تا ۳۱۸ (۱۴۰۳)
مقاله پژوهشی

ارزیابی تغییرات بیوشیمیایی و آنتی‌اکسیدانی دو رقم توت فرنگی پاروس و کویین الیزا تحت شرایط کم‌آبیاری

Evaluation of Biochemical and Antioxidant Changes of Two Strawberries (Paros and Queen Eliza) Cultivars under Deficit Irrigation Conditions

محمد سرسیفی[۱] علی سلیمانی[۱*]، ناصر قادری[۲] اسماعیل امیری[۱]

۱.گروه علوم باغبانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
۲. گروه علوم باغبانی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
*نویسنده مسئول، پست الکترونیک: (asoleimani@znu.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۷/۱۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۴/۲۸

چکیده

دراین پژوهش تاثیر تیمار کم‌آبیاری و ویژگی‌های آنتی‌اکسیدانی و بیوشیمایی میوه و برگ گیاه توت‌فرنگی (*Fragaria x ananassa* Dusch.) ارقام پاروس (Paros) و کویین الیزا (Queen Eliza) در دو سال متوالی (۱۳۹۹-۱۳۹۸) در فصول مختلف رشدی بهار، تابستان و پاییز مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش به‌صورت کرت‌های خرد شده بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی، با سه سطح آبیاری (۰، ۳۰ و ۶۵ درصد تخلیه رطوبتی خاک) در سیستم کاشت‌پشته‌ای دوردیفه و آبیاری قطره‌ای در بستر خاکی، در فضای باز ایستگاه تحقیقات کشاورزی گریزه شهرستان سنندج، به‌اجرا درآمد. بر اساس مقایسه میانگین‌ها: کم‌ترین مقدار آسکوربات (۴۴/۸) و بیش‌ترین مقدار آن (۷۳/۵) (بر حسب میکرومول برگرم وزن‌خشک)، به ترتیب در تیمار شاهد و تیمار ۶۵ درصد تخلیه‌رطوبتی مشاهده شد. در روندی مشابه، مقدار گلوتاتیون (بر حسب میکرومول برگرم وزن‌خشک) در تیمار ۶۵ درصد تخلیه‌رطوبتی حدود ۷۴ درصد در مقایسه با تیمارشاهد افزایش نشان داد. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که محتوای آنزیم پلی‌فنل‌اکسیداز و فنیل‌آلانین‌آمونالیاز با افزایش شدت تنش کم‌آبیاری در برگ توت‌فرنگی به‌صورت معنی‌داری افزایش یافت، به‌طوریکه بیشترین مقدار آنزیم‌های PAL و PPO به‌ترتیب ۴۳/۳ و ۰/۵۸ (واحد پروتئین بر میلی‌گرم) در تیمار ۶۵ درصد تخلیه‌رطوبتی و در تابستان مشاهد شدند. ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و مقدار فنل‌کل و فلاونوئید کل با بالارفتن شدت تنش کم‌آبیاری روند افزایشی داشتند به‌طوری‌که در تنش کم‌آبیاری شدید مقدار این صفات به ترتیب ۳۵، ۴۸ و ۹۲ درصد در مقایسه با شاهد افزایش پیدا کردند. برهمکنش رقم و سال بر محتوای آنزیم فنیل‌آلانین‌آمونالیاز و فنولیک اسید، به‌خصوص در فصول تابستان و پاییز، معنی‌دار شد. آزمون مقایسه میانگین‌ها بیشترین مقدار این صفات در رقم کویین‌الیزا را به ترتیب (۴۱/۶۷) واحد در میلی‌گرم پروتئین و (۴/۸۰) میلی‌گرم در گرم وزن تر نشان دادند. به‌طور کلی در تنش ملایم کم‌آبیاری، شاخص‌های بیوشیمیایی میوه حفظ و بهبود پیدا کردند. همچنین تغییر صفات در برگ و میوه نشان داد که در مقایسه بین دو رقم، "کویین‌الیزا" از تحمل بالاتری برخوردار بود.

واژه‌های کلیدی: توت‌فرنگی، صفات آنتی‌اکسیدانی، پلی‌فنول‌ها، پرولین، تنش خشکی.

مقدمه

در سال‌های اخیر کمبود منابع آب از مهم‌ترین دغدغه‌های بخش‌کشاورزی ایران بوده است. پیآمدهای تغییر اقلیم و شیب کاهنده‌ی بارش‌ها از سویی و گرم شدن هوا از سوی‌دیگر و هم‌زمانی تقاضای جمعیت برای تولید موادغذایی تا حدودی اوضاع را بحرانی‌تر نموده است. در چنین شرایطی مطالعه در زمینه بهره‌وری آب، بسیار ضروری و در اولویت فعالیت‌های بخش‌کشاورزی است (Ebrahimie *et al*., 2003). به موازات نقش تکنولوژی در بهینه کردن مصرف آب، کم‌آبیاری تنظیم شده و مصرف آب

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2025-07-09]

متناسب با مراحل فنولوژی گیاه می‌تواند به‌عنوان یک روش جایگزین مناسب در نظر گرفته شود. تنظیم آبیاری مزارع و باغ‌ها، منطبق با نیاز گیاه در مراحل مختلف رشد، راهکاری اساسی در کاهش مصرف آب است. در شرایط کم‌آبی و با تخلیه رطوبتی خاک در اثر تبخیر و تعرق، پتانسیل مکش خاک منفی شده و ریشه در جذب آب ناتوان می‌ماند و در صورت تداوم این شرایط تنش‌خشکی اتفاق می‌افتد (Li & Wang, 2023) پاسخ اولیه بعضی گیاهان به تنش خشکی کاهش سطح برگ است، برگ های باقی مانده گیاهان مقاوم تا زمانی که به شدت تحت استرس قرار نگیرند عملکرد فیزیولوژیکی نسبتاً خوبی دارند. ریزش برگ یکی دیگر از واکنش‌های گیاه در شرایط کم‌آبی است. با این مکانیزم سطح تبخیر و تعرق در برگ‌های گیاه کاهش می‌یابد و نوعی فرار از خشکی در گونه‌های گیاهی چندساله اتفاق می‌افتد (Li *et al*., 2014). در اقلیم مدیترانه، خشکی یکی از مهمترین پیآمدهای تغییرات اقلیمی است که راندمان رشد و عملکرد گیاهان را کاهش داده و اکثر گیاهان عالی مکانیسم‌هایی برای تحمل تنش آبی و همچنین توانایی‌هایی برای افزایش کارایی مصرف آب خود کسب کرده‌اند (Ghaderi & Siosemardeh, 2013).

توت‌فرنگی با نام علمی *Fragaria x ananassa* Dusch یکی از محصولات مهم گلخانه‌ای و مزرعه‌ای در کشور است. ایران با تولید ۱۰۷ تن توت‌فرنگی و سطح زیرکشت گلخانه‌ای (۳۸۰ هکتار) و مزرعه‌ای (۶۲۸۵ هکتار)، در لیست کشورهای مهم تولیدکننده توت‌فرنگی در جهان قرار دارد (بی‌نام، ۱۴۰۲). این گیاه در زمره گیاهان با نیازمندی بالا به آب طبقه‌بندی شده و میزان آب و مدیریت آبیاری در تولید محصول نقش مهمی دارند. نیاز توت فرنگی به آب زیاد است زیرا گیاهان دارای سیستم ریشه زایی کم عمق، سطح برگ زیاد و محتوای آب میوه زیاد هستند (Ariza *et al*., 2021). در شرایط مزرعه، تنش کم‌آبی در تابستان، به علت گرما و نور آفتاب زیاد، می‌تواند در رشد توت‌فرنگی اختلال ایجادکرده و مقدار تولید را به‌شدت تحت تاثیر قرار دهد (Liu *et al*., 2007). توت‌فرنگی به‌دلیل داشتن ریشه‌های سطحی و کم‌عمق، سطح برگ زیاد و میوه آب‌دار، به حجم بالایی از آب در طول دوره رشد نیاز دارد تا بتواند محصول کافی و با کیفیت قابل قبول تولیدکند (Şener *et al*., 2023). پاسخ ارقام مختلف توت‌فرنگی به‌تنش خشکی متفاوت بوده است. برای مثال، مقایسه تاثیر تنش خشکی بر رشد و عملکرد سه رقم توت‌فرنگی نشان داد که با کم‌شدن محتوای آب خاک، رقم کاماروسا و مراک ثبات بیشتری در مقابل تغییرات فتوسنتز و رشد در مقایسه با رقم گاویوتا داشتند (Ghaderi & Siosemardeh, 2013). میزان تنظیم اسمزی، گستردگی سطح برگ و مقدار تعرق از شاخص‌های موردتوجه جهت انتخاب ارقام مختلف توت‌فرنگی از نظر تحمل به‌تنش خشکی می‌باشند (Grant *et al*., 2010). بنابراین شناخت واکنش‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمایی گیاه در مقابل تیمارهای مختلف کم‌آبیاری و مقدار آبی که در دسترس‌گیاه قرار می‌گیرد، و مکانیزم‌های متفاوتی که جهت مقابله با تنش از خود نشان می‌دهند، حائز اهمیت می‌باشد. هدف از مطالعه انجام‌شده، واکنش گیاه به‌تنش کم‌آبیاری در مراحل مختلف رشد در دو رقم مهم و تجاری توت‌فرنگی بر اساس شاخص‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمایی بود.

مواد و روش‌ها

مکان، زمان و نوع طرح آزمایشی

این پژوهش در مزرعه ایستگاه تحقیقاتی گریزه، در مختصات جغرافیایی یوتی‌ام شرقی ۶۸۴۵۱۷ و شمالی ۳۹۰۵۰۵۳ (UTM; Universal Transverse Mercator) متعلق به‌مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان واقع در شهر سنندج انجام گرفت. آمار هواشناسی چهل‌ساله منطقه، حداقل مطلق منفی ۳۱ و حداکثر مطلق مثبت ۴۴ درجه سانتیگراد را نشان می‌دهد. متوسط بارندگی استان ۴۵۰ میلی‌متر است که در مقایسه با متوسط بارندگی ایران (۲۵۰ میلی‌متر) در شرایط بهتر و در مقایسه با متوسط بارندگی جهان (۹۰۰ میلی‌متر) در شرایط نامساعدتری قرار دارد. در سیستم کاشت جوی‌پشته دوردیفه در بستر خاک با بافت رسی‌شنی، تحت آبیاری قطره‌ای سطحی از منبع چاه‌های ایستگاه که از آب رودخانه فصلی تغذیه می‌شدند. نشاهای دو رقم تجاری توت‌فرنگی (کوئین‌الیزا با منشاء آمریکایی و پاروس با منشاء ایتالیایی) از منشا بوته‌های دختری ریشه‌دار کلکسیون توت‌فرنگی، کاشته شدند. این ارقام روزکوتاه بوده و از ارقام سفت‌میوه با عملکرد بالا بوده که در دودهه اخیر معرفی شده‌اند (Ranjbar *et al*., 2014). آزمایش به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. تیمارها شامل سه سطح آبیاری براساس درصدهای مختلف تخلیه رطوبتی خاک شامل ۰، ۳۰ و ۶۵ (به‌ترتیب I_1، I_2 و I_3) به‌عنوان عامل اصلی و ارقام توت‌فرنگی کوئین‌الیزا و پاروس به‌عنوان عامل فرعی در نظر گرفته‌شدند. در

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2025-07-09]

این آزمایش عرض پشته و فاصله بین پشته‌ها هرکدام ۸۰ سانتی‌متر، تراکم بوته در روی پشته ۴۰×۲۵ سانتی‌متر بود و در هر کرت آزمایشی تعداد ۳۰ نشاء کاشته شد. مبارزه با علف‌هرز به‌صورت مکانیکی و میزان مصرف کودکامل آلی و شیمیایی بر اساس آزمون خاک (مقدار سه کیلوگرم کود پوسیده حیوانی در مترمربع و کودهای شیمیایی به‌نسبت پتاس (۱۶/۶ درصد)، فسفر (۸/۷ درصد) و ازت (۲۰ درصد) به‌صورت مصرف خاکی و کود میکرو کامل در غلظت ۲.۵ درهزار در پانزدهم ماه‌های اردیبهشت، خرداد و شهریور و کود کلسیم-بور با غلظت ۳ درهزار در اواخر خرداد و نیمه مرداد به‌صورت محلول‌پاشی) انجام شد. اجرای آزمایش در طی دو سال (Y_1و Y_2) در یک مزرعه صورت گرفت. نمونه‌برداری جهت ثبت متغیرهای مورد بررسی درسه مرحله مختلف رویش بهاره، (گل‌دهی و میوه‌دهی) در اواخر اردیبهشت (T_1)، رویش تابستانه (تولید ساقه‌های رونده) در اواخر مرداد (T_2) و رویش پاییزه (آغاز رکود و گل‌انگیزی)، در اواخر مهر (T_3) صورت گرفت. داده‌های هر مرحله به‌صورت جداگانه مورد تجزیه آماری قرارگرفتند.

ارزیابی صفات

در فصل بهار و در زمان رسیدن میوه‌ها (رنگ‌گیری ۷۰ درصد از بافت ظاهری میوه)، به‌هنگام صبح و از میوه‌های برداشت‌شده سری دوم گل‌آذین توت‌فرنگی، نمونه میوه تهیه شد. ارزیابی خصوصیات کیفی میوه توت‌فرنگی با روش تهیه عصاره فریزشده در منفی۷۰ درجه سلسیوس در دو سال پیاپی انجام شد. از خصوصیات کیفی میوه‌های برداشت شده، مقدار موادجامدمحلول، اسیدیته‌قابل‌تیتراسیون، محتوای ویتامین سی، میزان آنتوسیانین‌کل، محتوای فنل‌کل، مقدار فلاونوئیدکل و ظرفیت ضداکسایشی اندازه‌گیری شدند. موادجامدمحلول به‌وسیله رفراکتومتر دیجیتالی مدل (A. PAL-1)، اسیدیته قابل‌تیتراسیون (به‌روش هیدروکسید سدیم ۰/۱ نرمال و فنل فتالئین ۱ درصد)، (Iranzo *et al.*, 1984)، محتوای ویتامین ث به‌روش تیتراسیون (Bor *et al.*, 2006)، میزان آنتوسیانین‌کل در عصاره به‌روش تفاوت pH (Wagner, 1979) و محتوای فنل‌کل به‌روش فولین‌سیوکالتیو در طول‌موج ۶۵۰ نانومتر تعیین شد (The Folin–Ciocalteu reagent) (Sharma *et al.*, 2001). مقدار فلاونوئیدکل به‌روش رنگ‌سنجی کلرید آلومینیوم در طول‌موج ۵۰۷ نانومتر با دستگاه طیف‌سنج نوری انجام شد (colorimetric) (Kaijv *et al*, 2006). ظرفیت ضداکسایشی به‌روش رادیکال پایدار دی‌فنیل‌پیکریل‌هیدرازیل (DPPH, 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl) و قرائت در طول موج ۵۱۷ نانومتر توسط اسپکتروفتومتر انجام شد (Ebrahimzadeh *et al.*, 2010). ارزیابی صفات بیوشیمیایی در برگ به‌روش نمونه‌برداری برگی در سه‌زمان و تهیه نمونه فریزشده در منفی۷۰ درجه انجام شد. اندازه‌گیری میزان مالون‌دی‌الدئید (Bandeoglu *et al.*, 2004)، کربوهیدرات‌های محلول‌کل (Ghorbani *et al.*, 2009)، میزان پراکسیدهیدروژن (Sharova *et al.*, 2023). پرولین (Ahmadi & Siosemardeh, 2004) و غلظت پروتئین‌های محلول (Bradford, 1976) ، مقادیر آسکوربات‌کل (Gillespie & Ainsworth, 2007) و گلوتاتیون احیا (Salbitani *et al.*, 2017) و آنزیم‌های‌پلی‌فنل‌اکسیداز (Medda *et al.*, 2020) و فنیل‌آلانین‌آمونالیاز (D'Cunha *et al.*, 1996) در نمونه‌های برگی اندازه‌گیری شدند.

روش تهیه اسیدیته قابل تیتراسیون

برای اندازه‌گیری اسیدهای آلی ابتدا ۱۰ میلی‌لیتر از عصاره میوه را توسط پیپت داخل ظرف شیشه‌ای ریخته و به آن ۲۰ تا ۳۰ میلی‌لیتر آب مقطر اضافه شد. داخل محلول فوق ۲ تا ۳ قطره معرف فنل‌فتالئین ۱درصد اضافه و سپس عمل سنجش حجمی (تیتراسیون) توسط هیدروکسید سدیم ۰/۱ نرمال انجام شد هنگامی که رنگ محلول حاوی عصاره میوه به‌رنگ قرمز روشن تبدیل شد عمل تیتراسیون خاتمه می یابد. برای تهیه محلول فنل‌فتالئین ۱ درصد مقدار ۱ گرم از پودر آن‌را در اتانول ۹۰ درصد حل کرده و حجم محلول به ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد. براساس مقدار هیدروکسید سدیم مصرف شده در عمل تیتراسیون، مقدار اسید در عصاره میوه به‌صورت درصد یا گرم در ۱۰۰ میلی‌لیتر عصاره میوه محاسبه گردید (Iranzo *et al.*, 1984).

معادله مورد استفاده: $A = \frac{(S \times N \times F \times E)}{C} \times 100$

در این معادله: A = مقدار اسید در عصاره میوه (گرم در صد میلی‌لیتر). S = مقدار سود مصرف شده (میلی‌لیتر). N = نرمالیته (NaOH). F = فاکتور (NaOH). C = مقدار عصاره میوه (میلی‌لیتر). E = اکی‌والان اسید.

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2025-07-09]

میزان اسید آسکوربیک

ویتامین ث یا ال آسکوربات از ویتامین‌های محلول در آب محسوب می‌شود. به این منظور ۱۰۰ میکرولیتر از آب‌میوه با ۱۰ میلی‌لیتر اسید متافسفریک ۱ درصد مخلوط شد، سپس ۱۰۰۰ میکرولیتر از محلول حاصل با ۹ میلی‌لیتر ۲و۶ دی کلرو ایندوفنول ۵۰ میکرومولار برای چند ثانیه با همزن انگشتی تکان داده شد. میزان جذب نمونه در طول‌موج ۵۱۵ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر مدل T60 UV visible اندازه‌گیری شد. برای محاسبه میزان ویتامین ث نمونه‌ها از منحنی استاندارد اسید آسکوربیک استفاده شد (Bor *et al.*, 2006).

روش اندازه‌گیری آنتوسیانین کل

برای اندازه‌گیری مقدار آنتوسیانین در تیمارهای مختلف از روش اختلاف pH استفاده شد. ابتدا دو نمونه بافر با استفاده از محلول‌های کلریدپتاسیم (pH=1 و 0.025M) و استات‌سدیم (pH=4.5 و 0.4M) تهیه شد. میزان ۴۰۰ میکرولیتر از عصاره با ۳/۶ میلی‌لیتر از بافرها به‌طور جداگانه مخلوط شد و سپس میزان جذب هر دو نمونه تهیه شده در طول‌موج‌های ۷۰۰ و ۵۱۰ نانومتر و با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر T60 UV visible اندازه‌گیری گردید. میزان آنتوسیانین توسط فرمول زیر محاسبه شد و به‌صورت میلی‌گرم سیانیدین-۳-گلوکوزاید در ۱۰۰ میلی‌گرم آب‌میوه گزارش شد (Wagner, 1979).

رابطه مورد استفاده: $A= (A_{510}-A_{700})_{pH1.0} - (A_{510}-A_{700})_{pH4.5}$ $\quad$ $Total\ Anthocyanin=A\times 449.2\times DF\times 1000/26900$

در این فرمول ۴۴۹/۲ جرم مولکولی سیانیدین-۳- گلیکوزاید، ۲۶۹۰۰ جذب مولی آن در pH=1 و DF فاکتور رقیق سازی است .

روش اندازه‌گیری فنول کل

از روش فولین‌سیوکالتیو میزان فنول‌کل اندازه‌گیری شد. ۲۰ میکرولیتر آب‌میوه با ۱۸۰ میکرولیتر از محلول ۵۰ درصد فولین-سیوکالتیو و ۹۰۰ میکرولیتر سدیم‌کربنات ۲ درصد مخلوط گردید. مخلوط به‌مدت ۹۰ دقیقه در دمای اتاق در تاریکی نگهداری شد. جذب مخلوط واکنش در طول‌موج ۶۵۰ نانومتر به وسیله دستگاه اسپکتروفتومتر مدل T60 UV Visible اندازه‌گیری گردید. سپس منحنی استاندارد فنول با استفاده از غلظت‌های مختلف گالیک‌اسید رسم شد و میزان فنول نمونه‌ها به‌صورت میلی‌گرم گالیک‌اسید در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب‌میوه گزارش شد (Sharma *et al.*, 2001).

روش اندازه‌گیری فلاونوئید کل

محتوای فلاونوئیدکل با روش رنگ‌سنجی مورد ارزیابی قرار گرفت و جذب محلول توسط اسپکتروفتومتر در طول‌موج ۵۰۷ نانومتر خوانده شد (Kaijv *et al.*, 2006).

روش اندازه‌گیری ظرفیت ضد اکسایشی

ظرفیت ضداکسایشی (آنتی‌اکسیدانی) عصاره میوه‌ها از طریق ویژگی خنثی‌کنندگی رادیکال آزاد (۱و ۱-دی فنیل ۲-پیکریل هیدرازیل) تعیین گردید. ۲۲ میکرولیتر از عصاره آب‌میوه به ۲۰۰ میکرولیتر محلول DPPH ۰/۱ میلی‌مولار اضافه شد. مخلوط پس از افزودن DPPH به‌سرعت به‌هم زده شد، سپس در دمای اتاق به‌مدت ۳۰ دقیقه در شرایط تاریکی تا رسیدن محلول به‌حالت یکنواخت نگهداری شد. کاهش میزان جذب در طول‌موج ۵۱۷ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر مدل T60 UV visible تعیین شد. از محلول تریس به‌عنوان (Blank) استفاده گردید. سپس ظرفیت ضداکسایشی عصاره‌ها به‌صورت درصد بازدارندگی DPPH محاسبه گردید (Ebrahimzadeh *et al*, 2010).

رابطه مورد استفاده: $DPPHSC(\%)=A\ control-A\ sample/A\ control\times 100$

A sample: عدد قرائت شده نمونه توسط دستگاه اسپکتروفتومتر، A control: میزان جذب (۱ میلی لیتر تریس + ۱ میلی‌لیتر DPPH)

روش اندازه‌گیری مالون‌دی‌آلدئید (MDA)

میزان جذب توسط دستگاه اسپکتروفتومتر در طول‌موج ۵۳۵ نانومتر و ضریب خاموشی دستگاه (1.56×10^5L/cm.mmol) اندازه‌گیری و غلظت (MDA) محاسبه شد. ۱۵۰ میلی‌گرم بافت تهیه شده در بافر فسفات ۱۰۰ میلی‌مولار هموژن شد. ۱ میلی‌لیتر از محلول رویی به‌لوله درب‌دار منتقل و به‌آن ۲ میلی‌لیتر از معرف (TBA; Thiobarbituric acid) اضافه و ورتکس شد. سپس درب لوله بسته و به‌مدت ۱۵ دقیقه در حمام آب‌جوش قرار داده شد. لوله‌ها پس از سرد شدن در دمای اتاق، به‌مدت ۱۰ دقیقه با قدرت ۳۰۰۰ گرم سانتریفوژ شدند. جذب محلول رویی در مقابل بلانک (غلظت صفر استاندارد) در طول‌موج ۵۳۵

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2025-07-09]

نانومتر توسط اسپکتروفتومتر خوانده شد و غلظت (MDA) با استفاده از ضریب خاموشی آن محاسبه شد (Bandeoglu *et al.*, 2004).

کربوهیدرات‌های محلول کل

مقدار ۰/۱ گرم از نمونه خشک‌شده برگ که کاملا پودر شده در ۱۵ میلی‌لیتر اتانول ۸۰ درصد ریخته و بعد از ۲۰ ثانیه ورتکس، با کاغذ صافی صاف شد و در آون با دمای ۵۰ درجه سلسیوس قرار داده شد تا اتانول تبخیر شد به‌منظور حفظ رسوبات اضافی و ترکیبات دیگرمقدار ۵ میلی‌لیتر محلول ۵ درصد سولفات‌روی و ۴/۷ میلی‌لیتر محلول هیدروکسیدباریم ۰/۳ نرمال اضافه گردید و بعد از سانتریفیوژ، به‌میزان ۲ میلی‌لیتر از عصاره شناور ۱ میلی‌لیتر محلول ۵ درصد فنل اضافه شد و بعد از آنکه خوب به‌هم زده شد به‌آن ۵ میلی‌لیتر اسید سولفوریک غلیظ اضافه شد و بعد از ۴۵ دقیقه جذب نور با دستگاه اسپکتروفتومتر (UV-VIS) در طول‌موج ۴۸۵ نانومتر خوانده شد (Ghorbani *et al.*, 2009).

روش اندازه‌گیری پراکسیدهیدروژن (H_2O_2)

برای اندازه‌گیری میزان پراکسید هیدروژن ۰/۵ گرم نمونه برگی در ۵ میلی‌لیتر از محلول ۰/۱ درصد تری‌کلرواستیک‌اسید (وزنی-حجمی) همگن شده و در ۱۲۰۰۰گرم به مدت ۳۲ دقیقه سانتریفوژ گردید. سپس کمپلکس واکنش با ترکیب ۰/۵ میلی‌لیتر رویی، ۰/۵ میلی‌لیتر بافر فسفات ۱۰ میلی‌مولار (اسیدیته ۷) و ۱ میلی‌لیتر یدیدپتاسیم ۱ مولار بدست آمد. میزان جذب نمونه‌ها در طول‌موج ۳۹۰ نانومتر ثبت گردید. میزان پراکسیدهیدروژن با استفاده از منحنی استاندارد به‌دست آمد (Sharova *et al.*, 2023).

روش اندازه‌گیری پرولین

برای اندازه‌گیری مقدار پرولین آزاد ۰/۰۱ گرم بافت تر برگ را در ۱۰ میلی‌لیتر محلول ۳ درصد اسید سولفوسالیسیک سائیده و مخلوط یکنواختی تهیه گردید مخلوط حاصل به‌مدت ۱۰ دقیقه در سرعت ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شد. در این روش از معرف نین‌هیدرین استفاده شد. میزان جذب فاز رنگی محلول فوق که حاوی تولوئن و پرولین است در طول‌موج ۵۲۰ نانومتر قرائت گردید و مقدار پرولین در هر نمونه با استفاده از منحنی استاندارد و برحسب میلی‌مول درگرم وزن تازه نمونه، تعیین شد (Ahmadi & Siosemardeh, 2004).

روش اندازه‌گیری پروتئین های محلول‌کل

عصارهٔ پروتئینی در بافر سدیم فسفات با غلظت ۵۰ میلی‌مولار و (pH =6.8) استخراج و به‌مدت ۲۰ دقیقه با سرعت ۱۵۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شد. از محلول رویی حاصل برای سنجش پروتئین کل با روش برادفورد استفاده شد (Bradford, 1976).

روش تهیه آسکوربات کل

یک گرم نمونه برگ (۲۰ میلی‌گرم از محلول استخراج‌کننده به ازای ۱ گرم از نمونه برگ) توسط محلول ۵ درصد اسید متافسفریک در هاون چینی به‌طور کامل خرد گردید. سپس نمونه حاصله را به‌مدت ۲۰ دقیقه با سرعت ۸۰۰۰ دور در دقیقه در دمای ۴ درجه سلسیوس سانتریفیوژ و محلول شفاف تهیه شده جهت اندازه‌گیری آسکوربات به‌کار برده شد. سپس ۴ میلی‌لیتر از محلول سانتریفوژ شده و نیم میلی‌لیتر از محلول دی‌کلرو ایندوفنل (DCIP) سه میلی‌مولار، اضافه گردید تا اسید آسکوربیک را به اسید دی‌هیدروآسکوربیک اکسید کند. سپس محلول شاهد با استفاده از ۱ میلی‌لیتر اسید متافسفریک ۵ درصد و افزودن ۰/۵ میلی‌لیتر ، محلول دی‌کلرو ایندوفنل سه میلی‌مولار، آماده گردید. سپس ۱ میلی‌لیتر تیواوره ۱ درصد اضافه شد. نمونه‌ها به‌مدت ۲۰ دقیقه ساکن ماندند. سپس ۱ میلی‌لیتر اسید سولفوریک ۲۰ درصد فقط به‌محلول شاهد اضافه شد. اما به‌نمونه، ۱ میلی‌لیتر محلول ۲ و۴ دی‌نیترو فنیل‌هیدرازین (DNPH) ۱۰ میلی‌مولار، اضافه گردید تا مشتق ۲ و ۴ دی‌نیترو فنیل‌هیدرازین از اسید دی‌هیدروآسکوربیک تشکیل شود. سپس لوله‌ها به‌مدت یک ساعت در حمام آب ۵۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند، سپس به‌مدت ۲۰ دقیقه در حمام یخ قرار گرفته و در حمام یخ به‌تدریج اسید سولفوریک ۸۵ درصد به‌نمونه‌ها اضافه شد و لوله‌ها ۳۰ دقیقه دیگر در حمام یخ ماندند. سپس ۱ میلی‌لیتر اسید سولفوریک ۲۰ درصد به‌لوله نمونه و ۱ میلی‌لیتر ۲ و۴ دی‌نیترو فنیل‌هیدرازین ۱۰ میلی‌مولار، به‌لوله شاهد اضافه گردید. سپس مقدار جذب در مقایسه با شاهد

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2025-07-09]

آماده‌شده، در طول‌موج ۵۲۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر UV-VIS اندازه‌گیری شد. نکته مهم اینکه مدت‌زمان پایداری کمپلکس‌های حاصله یک ساعت است، لذا اندازه‌گیری‌ها در مدت زمان یک ساعت انجام شد (Gillespie & Ainsworth, 2007).

روش اندازه گیری گلوتاتیون احیا (GSH)

در این روش، به ۲۰۰ میلی‌گرم بافت، ۸ میلی‌لیتر (Ethylene diamine tetra acetic acid) EDTA ۰/۰۲ مولار اضافه و هموژن شد. سپس، به ۵ میلی‌لیتر از هموژنات ۴ میلی‌لیتر آب مقطر و ۱ میلی‌لیتر محلول (TCA) ۵۰ درصد اضافه و به مدت ۱۰ تا ۱۵ دقیقه ورتکس شد. درمرحله بعدی، برای رسوب کامل پروتئین‌های بافتی مخلوط به‌مدت ۱۵ دقیقه در ۳۰۰۰ دور در دقیقه در دمای اتاق سانتریفوژ شد. ۲ میلی‌لیتر از محلول رویی با ۴ میلی‌لیتر بافر تریس حاوی (EDTA) ۰/۲ مولار و ۰/۱ میلی‌لیتر محلول (DTNB) ۰/۰۱ مولار در متانول مخلوط و بلافاصله جذب آن توسط اسپکتروفتومتر در طول موج ۴۱۲ نانومتر قرائت شد (Salbitani *et al.*, 2017).

روش اندازه گیری آنزیم پلی‌فنل اکسیداز (PPO)

در این روش از پیروگالل به‌عنوان پیش‌ماده آنزیم استفاده شد. در این واکنش مخلوط واکنش شامل ۲/۵ میلی‌لیتر بافر پتاسیم‌فسفات ۵۰ میلی‌مولار در (pH= 7)، ۲۰۰ میکرولیتر پیروگالل ۰/۰۲ مولار و ۱۰۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی بود. جذب نمونه‌ها در طول‌موج ۴۲۰ نانومتر و بعد از ۳ دقیقه خوانده‌شد. ضریب خاموشی استفاده شده برای محاسبه واحد آنزیمی معادل 2/6 mM-1 Cm-1 بود (Medda *et al.*, 2020).

سنجش فعالیت آنزیم فنیل‌آلانین‌آمونیالیاز (PAL)

یک میلی‌لیتر بافر پتاسیم‌فسفات ۵۰ میلی‌مولار (pH=7)، ۰/۵ میلی‌لیتر فنیل‌آلانین ۱۰ میلی‌مولار، ۰/۴ میلی‌لیتر آب دوبار تقطیر و ۰/۱ میلی‌لیتر عصاره آنزیمی مخلوط شدند و به‌مدت ۱ ساعت در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. واکنش با اضافه کردن ۰/۵ میلی‌لیتر کلریدریک‌اسید ۶ مولار متوقف شد و جذب نمونه‌ها در طول‌موج ۲۶۰ نانومتر اندازه‌گیری گردید. برای محاسبه سینامیک اسید تولید شده از منحنی استاندارد سینامیک اسید استفاده شد (D'Cunha *et al.*, 1996).

واکاوی داده‌ها

تجزیه واریانس داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری سس ($SAS_{9.1}$; Statistical Analysis System)، به‌صورت کرت‌های خردشده انجام شد و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون آماری حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD; Least Significant Difference) ، صورت گرفت.

نحوه محاسبه تیمارهای تخلیه رطوبت

نقطه ظرفیت نگهداری آب مزرعه (IFC; Irrigation Field Capacity) ، درمحدوده خاک کرت‌های آزمایشی مورد استفاده، مقدار ۰/۲۸ رطوبت حجمی خاک محاسبه شد و نقطه پژمردگی در مزرعه (PWP; Permanent Wilting Point)، در همان محدوده ۰/۱۳ رطوبت حجمی خاک بدست آمد. در فاصله بین این دو نقطه، یعنی در محدوده ۲۸-۱۳ درصد رطوبت حجمی خاک، تنش مورد نظر اعمال شد. براین اساس در نقطه شاهد یا صفر، رطوبت حجمی ۰/۱۵ را برای خاک تامین و به آستانه ۰/۲۸ رطوبت حجمی خاک یا همان ظرفیت نگهداری خاک، رسانده شد. برای این منظور اگر حجم خاک هر تیمار در طول، عرض و عمق خاک بر حسب متر (۰/۴۵= ۰/۲۵× ۰/۶ × ۳) برابر ۰/۴۵ متر مکعب باشد، برای رسیدن به نقطه ظرفیت زراعی، مقدار ۶۷/۵ لیتر (۰/۰۶۷۵= ۰/۴۵× ۰/۱۵) آبیاری در هر کرت لازم است. برای تیمار (۳۰ درصد تخلیه‌رطوبتی) خاک، (یعنی تامین ۷۰ درصد رطوبت خاک)، درحدود ۴۷/۲۵ لیتر (۴۷/۲۵= ۰/۷۰×۶۷/۵) آبیاری نیاز است. همین‌طور برای (۶۵ درصد تخلیه‌رطوبتی) یعنی تامین ۳۵ درصد رطوبت خاک، به ۲۳/۶۲۵ لیتر آبیاری در هر کرت (۲۳/۶۲۵= ۰/۳۵×۶۷/۵) نیاز است. با توجه به سیستم آبیاری قطره‌ای، هر دو و یا سه روز در میان آبیاری انجام شد و هر بار رطوبت پشته‌ها با استفاده از روش تی‌دی‌آر (TDR; Time-Domain Reflectometry)، تعیین و نسبت به‌تیمار مربوطه، کسری آب جبران گردید. در واقع دورآبیاری تاثیرپذیر از رطوبت به‌دست آمده توسط روش تی‌دی‌آر بود در فروردین و اردیبهشت‌ماه تیمارهای تحت تنش در روزهای بارانی به‌طور موقت با نایلون پوشانده شدند به‌طوریکه راه نفوذ آب باران در این تیمارها بسته شدند.

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2025-07-09]

نتایج و بحث

نتایج جداول تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها نشان داد که شدت‌های مختلف کم‌آبیاری بر بیشتر صفات بیوشیمایی میوه توت‌فرنگی تاثیر معنی‌دار داشت. با افزایش شدت تنش، مقدار موادجامدمحلول، اسیدیته قابل تیتراسیون (اسیدیته کل) و آنتوسیانین کل میوه کاهش و میزان ویتامین ث، فلاونوئیدکل، فنل‌کل و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی افزایش پیدا کردند (جدول ۱).

فاکتورهای کیفی و بیوشیمایی مرتبط با میوه، مواد جامد محلول، اسیدیته کل و ویتامین ث میوه

مقدار مواد جامد محلول (TSS; Total Soluble Solid) تحت تیمار (۳۰ درصد تخلیه‌رطوبتی)، تغییر معنی‌دار نشان نداد، اما در تنش (۶۵ درصد تخلیه‌رطوبتی) به کم‌ترین مقدارخود (۶/۹۳ درصد) رسید (جدول ۱). پژوهشگران علت کاهش مقدار این صفت را به کاهش فتوسنتز و افزایش شدت تنفس در اثر تنش خشکی مرتبط می‌دانند. با کاهش فتوسنتز تولید مواد هیدروکربنه کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش شدت تنش، شکستن پلی‌ساکاریدها به اجزای کوچک‌تر و مصرف بیشتر منوساکاریدها و دی‌ساکاریدها اتفاق افتاده، در نهایت میزان مواد جامد محلول کاهش پیدا می‌کنند (Ariza *et al*., 2021). میزان اسیدیته‌کل‌میوه (TA; Total acid)، تحت تنش کم‌آبی، کاهش پیدا نمود. کم‌ترین مقدار این صفت (۵/۸۴ میلی‌گرم در صدگرم وزن تر) تحت شرایط تیمار (۶۵ درصد تخلیه‌رطوبتی) با اختلاف بسیار معنی‌دار مشاهده شد. در راستای این تحقیق، سایر پژوهشگران تغییرات اسیدیته کل تحت تاثیر تنش کم‌آبی در توت‌فرنگی را گزارش کرده اند (Ghaderi & Siosemardeh, 2013).

جدول۱- مقایسه میانگین اثرات کم‌آبیاری (I; I_1, I_2, I_3)، رقم (C; Queen Eliza و Paros) و سال (Y; Y_2 و Y_1) بر صفات بیوشیمیایی میوه توت فرنگی.

Table 1. Mean comparison of deficit irrigation (I; I_1, I_2 and I_3), cultivar (C; Paros & Queen Eliza) and year (Y; Y_1 and Y_2) effects on biochemical traits of strawberry fruit.

تیمارها Treatments	درصد موادجامدمحلول TSS	اسیدیته کل Total TA (mg/ 100gr FW)	ویتامین ث Vitamin C mg/100gr (FW)	فلاونوئید کل Total flavonoid (mg Q/ 100gr FW)	آنتوسیانین کل Total anthocyanin (mg P-3-G/100gr FW)	فنل کل Total phenol (mg GA/100gr FW)	ظرفیت ضداکسایشی Antioxidant capacity (%)
I_1	9.03a	831a	78.60b	36.60b	46.8a	102.84b	**25.6b**
I_2	9.50a	730a	89.40b	42.45b	31.2b	105.98b	**27.0b**
I_3	6.93b	584b	136.80a	72.7a	26.4b	153.63a	**34.7a**
Paros	7.54b	742	92.52b	54.40	34.8	120.74	**28.3b**
Queen Eliza	9.44a	686	110.82a	48.43	33.6	120.89	**29.8a**
Y_1	8.5	680	116.40	54.19	34.8	152.71	**30.11**
Y_2	8.3	740	88.98	48.64	33.6	108.92	**28.09**
I	**	**	**	**	**	**	**
C	*	ns	*	ns	ns	ns	*
Y	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

حروف متفاوت در هر ستون نشان دهنده وجود اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها بر اساس آزمون مقایسه میانگین LSD است. ns، * و ** به ترتیب نشان دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار، اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ و ۱ درصد است.

Different letters in each column indicate significant differences based on LSD analysis. 'ns' = non-significant, '*' = significant at 5% probability, '**' = significant at 1% probability.

گزارش متفاوتی در این‌خصوص، تاثیر تیمار کم‌آبیاری تنظیم‌شده در محصول توت‌فرنگی بر اسیدیته‌کل میوه را بی‌اثر اعلام نموده است (Shahnazari & Rezaiyan, 2015). مقدار ویتامین ث (C; Ascorbic acid)، با بالارفتن تنش، افزایش و تحت تیمار (تخلیه رطوبتی ۶۵ درصد) اختلاف بسیار معنی‌دار نشان داد و با بیش‌ترین مقدار (۱۳۶/۸ میلی‌گرم در صدگرم وزن تر) ثبت شد. ویتامین ث به‌عنوان یک شاخص ارزش غذایی میوه‌ها و سبزی‌ها، کاربرد فراوانی دارد و یکی از آنتی‌اکسیدان‌های مطرح و شناخته شده است که در شرایط تنش آبی و گرمایی، بسیار به سیستم ایمنی نبات کمک می‌کند

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2025-07-09]

(Ghasemnezhad *et al.*, 2012). در تایید این موضوع محققین داخلی تغییرات مقدار ویتامین ث در اثر تنش کم‌آبی را گزارش نموده‌اند (Fatemi *et al.*, 2009).

ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و متابولیسم ترکیبات فنولی میوه

ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و مقدار فنل کل و فلاونوئید کل با بالارفتن شدت تنش کم‌آبیاری، روند افزایشی داشتند. کم‌ترین مقادیر این صفات به‌ترتیب ظرفیت آنتی‌اکسیدانی (۲۵/۶ درصد)، مقدار فنل‌کل(۳۴/۸۴ میلی‌گرم در صدگرم وزن‌تر میوه) و مقدار فلاونوئید کل (۶/۶ میلی‌گرم کوئرسیتین در صدگرم وزن‌تر میوه) در تیمار آبیاری شاهد مشاهده شد. با اعمال تنش کم‌آبیاری، بویژه در تنش شدیدتر، مقدار این صفات به ترتیب ۳۵، ۴۸ و ۹۲ درصد در مقایسه با شاهد افزایش پیدا کردند. مقدار آنتوسیانین با بالارفتن تنش خشکی روند نزولی نشان داد و از مقدار (۰/۳۹) به مقدار (۰/۲۲ میلی‌گرم پلارگونیدین‌تری‌گلوکوزید در صدگرم وزن‌تر میوه) رسید (جدول ۱). سهم زیادی از ظرفیت آنتی‌اکسیدانی کل در توت‌فرنگی به‌دلیل ترکیب‌های فنلی و ویتامین ث است. بررسی‌ها نشان می‌دهند که توت‌فرنگی میزان بالایی فعالیت آنتی‌اکسیدانی دارد که با ترکیب‌های فنولی میوه‌ها مرتبط است (Scalzo *et al.*, 2005). گزارش‌هایی از افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی با بالارفتن شدت تنش خشکی در توت‌فرنگی وجود دارد (Sun *et al.*, 2015). در تایید نتایج بدست آمده، در پژوهش مشابهی محتوای فنل کل در نمونه میوه تازه و نمونه خشک‌شده به‌طور معنی‌داری در توت‌فرنگی رقم فلامنکو افزایش یافت. در رقم توت‌فرنگی اوادلایت که تحت تنش کم‌آبیاری قرار داشت بیش از ۴۰ درصد مقدار فنل‌کل در نمونه میوه تازه، افزایش نشان داد. با این حال، در وزن خشک میوه افزایش محتوای فنلی را می‌توان بیشتر به اثر رقت آب نسبت داد (Weber *et al.*, 2018). به‌طور کلی میزان ظرفیت‌آنتی‌اکسیدانی و فنل‌کل در میوه‌های تحت‌تیمار با کم‌آبیاری بسیار بیش‌تر است. پژوهش‌ها نشان‌داده که عصارهٔ توت‌فرنگی فعالیت آنزیمی بالایی برای غیرفعال کردن اکسیژن‌های آزاد و هم‌چنین ظرفیت آنتی‌اکسیدانی بالایی در برابر رادیکال‌های آزاد بواسطه حضور ترکیبات فنلی دارد (Pineli *et al.*, 2011). از سوی دیگر، به نظر می رسد تنش خشکی با افزایش محتوای ترکیبات آنتی اکسیدانی و قندها یک راهکار امیدوارکننده برای بهبود کیفیت میوه توت فرنگی و کاهش مصرف آب باشد. با این حال، مقدار تنش وارد شده به گیاهان باید به دقت کنترل شود تا از کاهش عملکرد محصول و میزان زیست توده جلوگیری شود (Perin *et al.*, 2019).

آنتوسیانین‌ها در توت‌فرنگی به‌لحاظ کمی از مهم‌ترین ترکیب‌های پلی‌فنلی شناخته‌شده هستند. پلارگونیدین‌تری‌گلوکوزید فراوان‌ترین آنتوسیانین در همه رقم‌های توت‌فرنگی است که ۶۴-۳۱ درصد آنتوسیانین کل را تشکیل می‌دهد (Da Silva *et al.*, 2007). در حالت عادی، سنتز هورمون‌های گیاهی و فرآیند فتوسنتز، تجمع رنگیزه‌های کاروتنوئید و آنتوسیانین را در گیاه و محصول افزایش می‌دهند. هر عاملی از جمله تنش و سایر فاکتورهایی که در فرآیند فتوسنتز اختلال ایجاد کند از میزان تولید رنگیزه‌ها خواهد کاست که با نتایج این تحقیق سازگار است (Capitani *et al.*, 2005). هم‌چنین در تایید این گزارش، پژوهشگران همچنین مشاهده کردند که محتوای آنتوسیانین‌ها در میوه تحت تنش آبی کاهش می‌یابند، که با کاهش ژن‌های (UFGT)، که به شدت برای بیوسنتز و ذخیره‌سازی آنتوسیانین موردنیاز است، همبستگی دارد (Perin *et al.*, 2019). پژوهشگران دیگری نیز کاهش مشابهی در محتوای آنتوسیانین مشاهده کردند. با این‌حال، کاهش و یا افزایش در محتوای این ترکیبات وابسته به رقم بود (Weber *et al.*, 2017). ظرفیت آنتی‌اکسیدانی، ویتامین ث و مواد جامدمحلول تحت تاثیر تنش کم‌آبیاری در مرحله گل‌دهی و میوه‌دهی بر ارقام مورد مطالعه در سطح ۵ درصد معنی‌دار شدند. ظرفیت آنتی‌اکسیدانی، ویتامین ث و مواد جامدمحلول در رقم کویین‌الیزا نسبت به رقم پاروس بالاتر بود. از مهم‌ترین خصوصیات مرحله رویش بهاره، شروع رشد رویشی از دماهای پایین، مرحله شکوفاشدن جوانه‌های زایشی، تشکیل میوه و گرده‌افشانی و رشد میوه و رسیدگی میوه در یک فاز ۷۰ روزه است. در این مرحله علیرغم خنکی هوا، سرعت متابولیسم گیاهی بالا بوده و تنش کم‌آبیاری می‌تواند روی عملکرد و فعالیت اندام‌های سلولی تاثیر بگذارد. واکنش رقم کویین‌الیزا در مقابل تنش کم‌آبیاری در این مرحله نشان از تحمل بیشتر این رقم نسبت به رقم توت‌فرنگی پاروس دارد.

صفات بیوشیمیایی (پرولین، کربوهیدرات‌های محلول‌کل، پروتئین‌های محلول‌کل و مالون‌دی‌الدئید در بافت برگ)

از مهم‌ترین خصوصیات مرحله رویش تابستانه بوته توت‌فرنگی ادامه رشد رویشی بوته‌ها، تولید ساقه‌های رونده در روزهای بلند تابستان و مواجهه گیاه با دمای بالای هوا است. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در طول تابستان، به‌دلیل گرمای تابستان

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2025-07-09]

و تعرق بیش‌تر، تیمار کم‌آبیاری تاثیر معنی‌داری بر صفات بیوشیمایی برگ از قبیل مقدار پرولین، کربوهیدرات‌های محلول‌کل، پروتئین‌های محلول‌کل و مالون‌دی‌الدئید داشت و بیشترین مقادیر این صفات در تیمار (۶۵ درصد تخلیه‌رطوبتی) مشاهده شد. هم‌چنین در زمان نمونه‌برداری اردیبهشت‌ماه، تنها اثر تیمار رقم بر صفت کربوهیدارت‌های محلول معنی‌دار شد(جدول ۲). پرولین و کربوهیدرات‌های محلول‌کل با زیادشدن شدت تنش افزایش نشان‌دادند، بیش‌ترین مقادیر این ترکیبات به‌ترتیب (۰/۳۹ و ۲۱/۵ میلی‌گرم در گرم وزن‌تر برگ) در تیمار (۶۵ درصد تخلیه‌رطوبتی) خاک و در زمان تابستان ثبت شدند. مقدار پروتئین محلول‌کل برگ با افزایش شدت تنش کاهش پیدا کرد. کم‌ترین مقدار پروتئین (۰/۴۹ میلی‌گرم در گرم وزن تر برگ) در تیمار کم‌آبیاری شدید و در زمان پاییز و بیشترین مقدار آن (۰/۷۴ میلی‌گرم) در شرایط شاهد در تابستان اتفاق افتاد (جدول ۲).

در تنش کم‌آبیاری سیستم دفاعی گیاه، برای افزایش فشار اسمزی سلول‌های برگی و کمک به‌جذب آب بیشتر، تولید ترکیبات اسمولیتی را در داخل سلول‌های برگ افزایش می‌دهد. اسمولیت‌ها شامل کربوهیدرات‌ها، اسیدهای آلی (مالات و اگزالات) و ترکیبات نیتروژنی (پروتئین، پرولین، پوترسین، گلوتامات، و غیره) هستند (Kinnersley & Turano, 2000).

پرولین یکی از اسمولیت‌های سازگارکننده به‌شرایط تنش است که با تنظیم پیام‌رسانی، تنظیم اسمزی، تثبیت غشاهای سلولی، مهار رادیکال‌های آزاد و جلوگیری از پراکسیداسیون لیپیدها نقش سازگارکننده خودرا ایفا می‌کند (Hayat *et al.*, 2012). پرولین تحت تاثیر استرس خشکی افزایش معنی‌داری در دو رقم توت‌فرنگی نشان دادند (Ghaderi & Siosemardeh, 2011) افزایش پرولین موجبات افزایش فشار اسمزی و شرایط ادامه جذب آب را فراهم کرد. در ارقامی از توت‌فرنگی که میزان پرولین بالا بوده محتوای نسبی آب هم بالا بوده است این نکته بیانگر اینست که وجود پرولین زیاد در برگ توت‌فرنگی، به‌عنوان یک قابلیت در مقاومت به استرس های خشکی قلمداد می‌شود. کربوهیدرات‌های محلول و پرولین نقش مهمی در تنظیم اسمزی دارند. تنظیم اسمزی به‌عنوان یک ویژگی تحمل به‌خشکی در توت‌فرنگی شناخته شده است (Grant *et al.*, 2010). در شرایط تنش، کربوهیدرات‌های محلول (شکر محلول) به‌عنوان ترکیبات محافظ فشار اسمزی، آمادگی بیشتری برای سازگاری با تنش در گیاه ایجاد می‌کنند (Zahedi *et al.*, 2023).

در توجیه علمی دلیل کاهش پروتئین‌های محلول‌کل در بافت برگ توت‌فرنگی در مطالعه حاضر، می‌توان به کاهش کارآیی دستگاه فتوسنتزی در شرایط تنش خشکی اشاره داشت. در شرایط تنش خشکی، بسیاری از آنزیم‌های موثر در چرخه کالوین و همچنین فعالیت آنزیم‌هایی نظیر گلوتامین‌سنتتاز و گلوتامات‌سنتتاز با اختلال روبرو شده و سنتز پروتئین‌ها، کند و متوقف می‌گردد. هم‌چنین فعالیت گونه‌های فعال اکسیژن و میل زیاد اکسندگی این ترکیبات در تنش کم‌آبیاری، از عوامل غیرمستقیم کاهش پروتئین‌های محلول در برگ محسوب می‌شوند (Khan *et al.*, 2003). نتایج نشان داد که با افزایش شدت تنش‌خشکی در اثر کم‌آبیاری، میزان مالون‌دی‌آلدئید بافت برگ نیز افزایش پیدا کرد. برای مثال، مقدار آن در تنش (۶۵ درصد تخلیه‌رطوبتی) در تابستان نسبت به تیمار شاهد در زمان بهار در حدود ۲۶ درصد افزایش نشان داد (جدول۲). با افزایش شدت تنش، پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی بالا رفته و تخریب غشاء باعث کاهش پایداری آن‌ها و افزایش نشت یونی غشاء و تجمع مالون‌دی‌آلدئید در فضای بین‌سلولی می‌شود.

خصوصیات آنتی‌اکسیدانی بافت برگ و فعالیت آنزیم‌های PAL و PPO

با افزایش تنش کم‌آبیاری، مقادیر آسکوربات کل، گلوتاتیون احیا، فنولیک اسید و پراکسیدهیدروژن افزایش نشان دادند (جدول ۳). آنتی‌اکسیدان‌های غیرآنزیمی شامل مولکول‌های سبک آسکوربات، گلوتاتیون و کاروتینوئیدها هستند. چرخه آسکوربات-گلوتاتیون از چرخه‌های مهم درگیر در رفع تنش‌های اکسیداتیو است. گلوتاتیون و آسکوربات درآب محلول بوده و در اندامک‌های سلولی حضور دارند. این آنتی‌اکسیدان‌ها با رادیکال‌های فعال اکسیژن نظیر سوپراکسید و هیدروکسیل واکنش داده و آن‌ها را از بین می‌برند. کم‌ترین مقدار آسکوربات (۸ /۴۴ میکرومول برگرم وزن‌خشک) و بیش‌ترین (۷۳/۵ میکرومول برگرم وزن‌خشک)، به ترتیب در تیمار شاهد و تیمار (۶۵ درصد تخلیه‌رطوبتی) مشاهده شد. در روندی مشابه، مقدار گلوتاتیون برحسب میکرومول برگرم وزن‌خشک در تیمار (۶۵ درصد تخلیه‌رطوبتی) حدود ۷۴ درصد در مقایسه با تیمارشاهد افزایش نشان داد (جدول ۳). در تایید این بررسی، افزایش مقدارآسکوربات و گلوتاتیون در محصولات گیاهی در پاسخ به تنش کم‌آبیاری گزارش شده است (Gill & Tuteja, 2010). مقدار فنولیک‌اسید در تیمار (۶۵ درصد تخلیه‌رطوبتی)، در حدود ۱/۸

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2025-07-09]

واحد (بر حسب میلی‌گرم در گرم وزن خشک) بیشتر از مقدار آن در تیمار شاهد بود. تقریبا در همه آنتی‌اکسیدان‌های غیرآنزیمی فوق، تیمار (۶۵ درصد تخلیه‌رطوبتی) دارای بیشترین مقدار در کلاس a و تیمار شاهد و تیمار (۳۰ درصد تخلیه‌رطوبتی) با مقادیر کمتر از آن، به ترتیب درکلاس‌های c و b قرارگرفتند در مرحله نمونه برداری تابستانه (T2) برگ‌ها علاوه بر تاثیر تیمار کم‌آبیاری تحت تاثیر افزایش دمای هوا، آنتی‌اکسیدان غیرآنزیمی بیشتری تولید کردند (جدول۳).

خشکی، حساسیت دستگاه‌های فتوسنتزی گیاهان به‌اشعه ماوراء بنفش را افزایش می‌دهد. از طرف دیگر فنول‌های متصل به‌دیواره سلول می‌توانند نفوذپذیری سلول به‌اشعه ماوراء بنفش را کاهش دهند (Ebrahimie *et al.*, 2003). گزارش شده که محتوای فنل‌کل و فعالیت آنزیم فنیل‌آلانین آمونالیاز (PAL) در اثر تنش خشکی در گیاه افزایش یافت (Rezayian *et al.*, 2018). فنیل‌آلانین‌آمونالیاز و چند آنزیم دیگر به‌عنوان آنزیم‌های مسئول در مقابل تنش شناخته شده‌اند. ارتقای کارآیی آنزیم (PAL) با تنظیم افزایشی آنزیم‌های بیوسنتتیک کدشده توسط نسخه‌های ژنی مهم همراه شد (Gharibi *et al.*, 2019). صرف‌نظر از فصل‌رشد، بیش‌ترین میزان پراکسید هیدروژن (۸۶/۳ میکرومول درگرم وزن‌تر برگ) در تیمار (۶۵ درصد تخلیه‌رطوبتی) مشاهده شد (جدول ۳). پراکسیدهیدروژن از ROS های مهمی است که توسط سوپراکسیددیسموتاز تولید می‌شود (Ghannoum, 2008).

جدول۲- مقایسه میانگین اثرات کم‌آبیاری ($I; I_1, I_2, I_3$)، رقم ($C;$ Queen Eliza , Paros) و سال ($Y; Y_2 , Y_1$) بر صفات بیوشیمیایی بافت برگ دو رقم توت فرنگی در سه زمان مختلف اندازه‌گیری ($T; T_1, T_2 , T_3$).

Table 2. Mean comparison of deficit irrigation ($I; I_1, I_2, I_3$), cultivar ($C;$ Paros, Queen Eliza) and year ($Y; Y_1, Y_2$) effects on biochemical traits in strawberry leaf tissue at different growth stages ($T; T_1, T_2, T_3$)

	Different growth stages مراحل رشدی مختلف											
	T_1	T_2	T_3	T_1	T_2	T_3	T_1	T_2	T_3	T_1	T_2	T_3
تیمارها Treatments	پرولین Proline (mg/g FW)			کربوهیدرات‌های محلول soluble carbohydrates (mg/g FW)			پروتئین‌های محلول soluble proteins (mg/g FW)			مالون‌دی‌آلدئید MDA (nmol/g FW)		
I_1	0.16a	0.15c	0.15c	16.8a	16.9b	17.9a	0.73a	0.74a	0.69a	57.9a	60.7b	61.0b
I_2	0.31a	0.28b	0.25b	18.9a	19.1ab	18.9a	0.68a	0.64b	0.63b	58.9a	63.2b	62.9b
I_3	0.31a	0.39a	0.36a	20.6a	21.5a	20.5a	0.56b	0.50c	0.49c	69.5a	73.5a	71.8a
Paros	0.28a	0.27a	0.23b	17.8a	18.0a	17.9a	0.64a	0.62a	0.58a	64.6a	66.6a	66.1a
Queen Eliza	0.24a	0.28a	0.27a	19.7a	20.3a	20.3a	0.68a	0.63a	0.63a	59.5a	65.0a	64.3a
Y_1	0.21a	0.28a	0.25a	19.2a	19.3a	19.4a	0.67a	0.61a	0.61a	60.1a	66.3a	65.1a
Y_2	0.31a	0.26a	0.26a	18.3a	19.1a	18.7a	0.65a	0.64a	0.60a	64.1a	65.3a	65.3a
I	ns	**	**	ns	**	ns	**	**	**	ns	**	**
C	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Y	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

حروف متفاوت در هر ستون نشان دهنده وجود اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها بر اساس آزمون مقایسه میانگین LSD است. ns، * و ** به ترتیب نشان دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار، اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ و ۱ درصد است.

Different letters in each column indicate significant differences based on LSD analysis. 'ns' = non-significant, '*' = significant at 5% probability, '**' = significant at 1% probability.

در شرایط کم‌آبیاری، کاهش هدایت‌روزنه‌ای اتفاق افتاده و غلظت CO_2 در برگ کاهش می‌یابد. در نتیجه، چرخه کلوین مختل شده و تنفس‌نوری افزایش یافته و منجر به‌افزایش پراکسیدهیدروژن در پراکسی‌زوم‌ها می‌شود (Ghannoum, 2008). افزایش میزان پراکسیدهیدروژن در تنش خشکی در توت‌فرنگی گزارش شده‌است (Ariza *et al.*, 2021; Sun *et al.*, 2015). افزایش مقدار صفاتی مانند آسکوربات کل، فنولیک‌اسید و پراکسیدهیدوژن در پاسخ به‌تنش کم‌آبی بسته به‌رقم متفاوت بوده به‌طوریکه مقدار فنولیک‌اسید و آسکوربات‌کل در رقم کوئین‌الیزا کمتر بوده و آنزیم‌های اکسیدکننده این مواد نیز کمتر بوده است که نشان از مقاومت بیشتر رقم کوئین‌الیزا به‌تنش در مقایسه با رقم پاروس بوده است (جدول ۳).

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2025-07-09]

جدول۳- مقایسه میانگین اثرات کم‌آبیاری ($I; I_1, I_2, I_3$)، رقم (Paros و Queen Eliza ;C) و سال (Y_1 و Y_2 ;Y) بر محتوای آسکوربات، گلوتاتیون، فنولیک اسید و پراکسید هیدروژن نمونه برگی دو رقم توت‌فرنگی در سه مرحله رشدی مختلف ($T; T_1, T_2, T_3$) .

Table 3. Mean comparison of deficit irrigation ($I; I_1, I_2, I_3$), cultivar (C; Paros, Queen Eliza) and year ($Y; Y_1, Y_2$) effects on Ascorbate, glutathione, Phenolic acid, and H_2O_2 in leaf sample of strawberry at different growth stages ($T; T_1, T_2, T_3$).

	Different growth stages مراحل رشدی مختلف											
	T_1	T_2	T_3	T_1	T_2	T_3	T_1	T_2	T_3	T_1	T_2	T_3
Treat ments	آسکوربات Ascorbate (m. mole/g DW)			گلوتاتیون Glutat. (m. mole/g DW)			فنولیک‌اسید Phenolic acid (mg/g DW)			پراکسیدهیدروژن H_2O_2 (m. mole/g fw)		
I_1	50.0b	46.5b	44.8b	26.4b	28.8c	30.6b	2.81c	3.04c	3.16b	58.7b	61.4b	61.2b
I_2	52.6b	49.1b	48.5b	30.0b	34.6b	33.9b	3.48b	4.29b	3.55b	61.1b	62.8b	63.5b
I_3	65.1a	73.5a	65.3a	35.5a	46.1a	42.0a	4.91a	5.16a	4.87a	82.2a	86.3a	84.5a
paros	52.4b	51.6b	47.6b	34.6a	37.9a	35.5a	3.46b	3.84b	3.75a	69.6a	71.9a	70.5a
Queen Eliza	59.4a	61.1a	58.1a	26.9a	35.1a	35.4a	4.02a	4.49a	3.97a	65.1a	68.5a	68.9a
Y_1	54.2a	59.7a	51.8a	30.0a	43.2a	35.2a	3.46a	4.19a	3.80a	67.6a	71.1a	70.4a
Y_2	57.6a	53.1a	53.9a	31.2a	29.9a	35.8a	4.01a	4.14a	3.92a	67.1a	69.2a	69.1a
I	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
C	**	**	**	**	ns	ns	**	**	ns	ns	ns	ns
Y	ns	**	ns	ns	**	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns
I×C	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
I×Y	ns	**	ns	ns	*	ns	**	*	ns	ns	ns	ns
Y×C	ns	*	ns	ns	ns	ns	**	**	ns	ns	ns	ns
I×C×Y	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns

حروف متفاوت در هر ستون نشان دهنده وجود اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها بر اساس آزمون مقایسه میانگین LSD است. ns، * و ** به ترتیب نشان دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار، اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ و ۱ درصد است.

Different letters in each column indicate significant differences based on LSD analysis. 'ns' = non-significant, '*' = significant at 5% probability, '**' = significant at 1% probability.

نتایج یک تحقیق دیگر نشان می‌دهد که در شرایط تنش، مواد بیوشیمایی گیاه برای منفی‌تر کردن پتانسیل‌اسمزی افزایش یافته و هر مقدار گیاه مقاومت بیشتری از خود نشان‌داده سنتز موادی مانند فنولیک‌اسید، آسکوربات‌کل و گلوتاتیون‌احیا کاهش یافته‌است. در تایید این پژوهش، تحقیقات پیشین نیز نشان‌داد که تنش خشکی بر تبادلات گازی، سطح کلروفیل، پرولین و کربوهیدرات‌های محلول تأثیرگذار بوده‌است (Ghaderi & Siosemardeh, 2011). مقایسه میانگین‌ها نشان‌داد که محتوای آنزیم پلی‌فنل‌اکسیداز و فنیل‌آلانین‌آمونالیاز با افزایش شدت تنش کم‌آبیاری در برگ توت‌فرنگی به‌صورت معنی‌داری افزایش یافت، به‌طوریکه بیشترین مقدار آنزیم‌های PAL و PPO به‌ترتیب ۴۳/۳ و ۰/۵۸ (واحد پروتئین بر میلی‌گرم) در تیمار (۶۵ درصد تخلیه‌رطوبتی) و در تابستان مشاهد شد(جدول۴). در مورد فصول مختلف یادداشت‌برداری، روند تغییرات این آنزیم‌ها در تابستان افزایشی و در پاییز کاهشی بود (جدول ۴). علت این تغییرات را می‌توان به گرمای تابستان، شدت تنش و مرحله فنولوژیکی گیاه نسبت داد. پلی‌فنل‌اکسیداز به‌عنوان یک آنزیم کاتالیزورکننده در واکنش‌های اکسیداسیون عمل می‌کند. این آنزیم هیدرولیز منوفنل‌ها به‌یک دی‌فنل‌ها و اکسیداسیون یک دی‌فنل‌ها را به‌یک کوینون‌ها و معادل آن کاتالیز می‌کند و سبب تجمع ملانین به‌عنوان رنگیزه مسئول رنگ قهوه‌ای در بافت‌های گیاهی می‌شود (Falguera *et al*., 2011; Chiabrando & Giacalone, 2016). فنیل‌آلانین‌آمونالیازها، نیز با افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی، گیاهان را در برابر تنش‌های زنده و غیرزنده مقاوم می‌کنند. با افزایش آنزیم فعالیت PAL، سنتز و تجمع ترکیبات فنلی از قبیل فلاونوئیدها و فنل‌ها افزایش می‌یابند.

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2025-07-09]

جدول ۴- مقایسه میانگین اثرات کم‌آبیاری ($I; I_1, I_2, I_3$)، رقم (C; Queen Eliza و Paros) و سال ($Y; Y_2$ و Y_1) بر فعالیت آنزیم‌های فنیل‌آلانین‌آمونولیاز و پلی‌فنل‌اکسیداز نمونه برگی دو رقم توت‌فرنگی در سه فصل رویشی مختلف ($T; T_1, T_2, T_3$).

Table 4. Mean comparison of deficit irrigation ($I; I_1, I_2, I_3$), cultivar (C; Paros, Queen Eliza) and year ($Y; Y_1, Y_2$) effects on PAL and leaf PPO enzymes activity in leaf sample of strawberry in different growth seasons ($T; T_1, T_2, T_3$).

	Different growth stages مراحل رشدی مختلف					
تیمارها	T_1	T_2	T_3	T_1	T_2	T_3
Treatments	فنیل‌آلانین‌آمونولیاز PAL (U/mg protein)			پلی‌فنل‌اکسیداز PPO (U/mg Protein)		
I_1	28.0b	29.8c	31.4b	0.34c	0.36b	0.34b
I_2	31.2b	36.3b	31.9b	0.40b	0.42b	0.33b
I_3	41.5a	43.3a	41.2a	0.47a	0.58a	0.47a
Paros	32.5a	34.5b	33.6a	0.39a	0.39a	0.35a
Queen Eliza	34.6a	38.4a	36.1a	0.41a	0.52a	0.41a
Y_1	32.8a	37.3a	34.1a	0.40a	0.50a	0.37a
Y_2	34.3a	35.6a	35.6a	0.41a	0.40b	0.40a
I	**	**	**	**	*	**
C	ns	*	ns	ns	ns	**
Y	ns	ns	ns	ns	*	*
I×C	ns	ns	ns	ns	ns	ns
I×Y	ns	ns	ns	ns	ns	**
Y×C	ns	ns	**	ns	ns	ns
I×C×Y	ns	ns	ns	ns	ns	ns

حروف متفاوت در هر ستون نشان دهنده وجود اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها بر اساس آزمون مقایسه میانگین LSD است. ns، * و ** به ترتیب نشان دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار، اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ و ۱ درصد است.

Different letters in each column indicate significant differences based on LSD analysis. 'ns' = non-significant, '*' = significant at 5% probability, '**' = significant at 1% probability.

گزارش‌هایی از افزایش ۲۸/۲ درصدی فعالیت این آنزیم در پاسخ به‌مصرف برگی عنصر آهن در مرحله گل‌دهی توت‌فرنگی و تسریع رسیدن و رنگ‌گیری میوه وجود دارد (Rezaei *et al*., 2019). هم‌چنین افزایش فعالیت آنزیم آنتی‌اکسیدانی فنیل‌آلانین‌آمونالیاز تحت محلول‌پاشی SiO_2 در توت‌فرنگی تحت تنش خشکی گزارش شده است (Zahedi *et al*., 2023).

مقایسه میانگین‌ها نشان‌داد که برهمکنش رقم و سال بر محتوای آنزیم فنیل‌الانین‌آمونالیاز (جدول۵) و فنولیک‌اسید به‌خصوص در فصول تابستان و پاییز معنی‌دار شد و بیشترین مقدار این صفات به‌ترتیب (۴۱/۶۷ واحد پروتئین بر میلی‌گرم و ۴/۸۰ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) در رقم کوئین‌الیزا مشاهده شد. در مورد صفت فنولیک‌اسید، برهمکنش رقم و سال، تنها در زمان اندازه‌گیری تابستان معنی‌دار شد. بر این اساس تیمارهای کم‌آبیاری در طول دو سال روی دو رقم توت‌فرنگی کوئین‌الیزا و پاروس موثر بوده، به‌طوریکه بیشترین مقدار فنولیک‌اسید (۴/۸۰ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) در شرایط تنش شدید در تابستان و در رقم کوئین‌الیزا مشاهده شد (شکل ۱).

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2025-07-09]

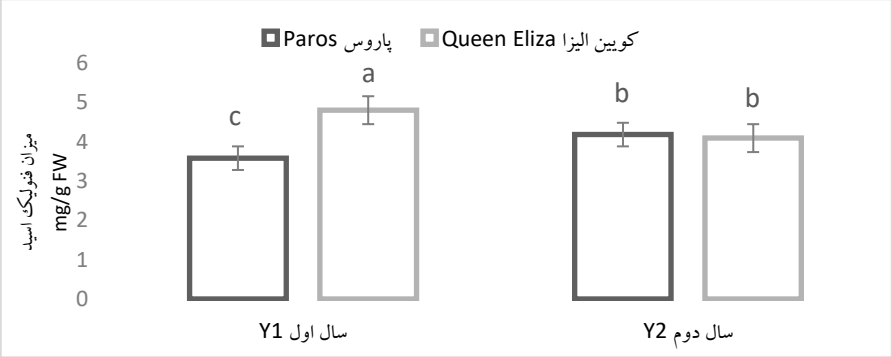
جدول ۵. مقایسه میانگین اثرات متقابل رقم (C; Paros, Queen Eliza) و سال (Year; Y_2, Y_1) بر محتوای فنیل‌آلانین‌آمونولیاز و فنولیک‌اسید در نمونه برگی توت‌فرنگی در دو فصل رشد مختلف (T; T_2, T_3).

Table 5. Mean comparison of cultivar (Paros, Queen Eliza) and year (Y; Y_1, Y_2) interaction effects on PAL and phenolic acid contents in leaf sample of strawberry at different growth seasons (T; T_2, T_3).

	فنیل‌آلانین‌آمونولیاز PAL (U/mg protein)				فنولیک اسید Phenolic acid (mg/g FW)	
	T_2*		T_3		T_2	
ارقام توت‌فرنگی Strawberry cultivars	Y_1	Y_2	Y_1	Y_2	Y_1	Y_2
Paros	33.00b	36.00b	29.89c	37.33ab	3.58c	4.09b
Queen Eliza	41.67a	35.20b	38.33a	33.78bc	4.80a	4.18b

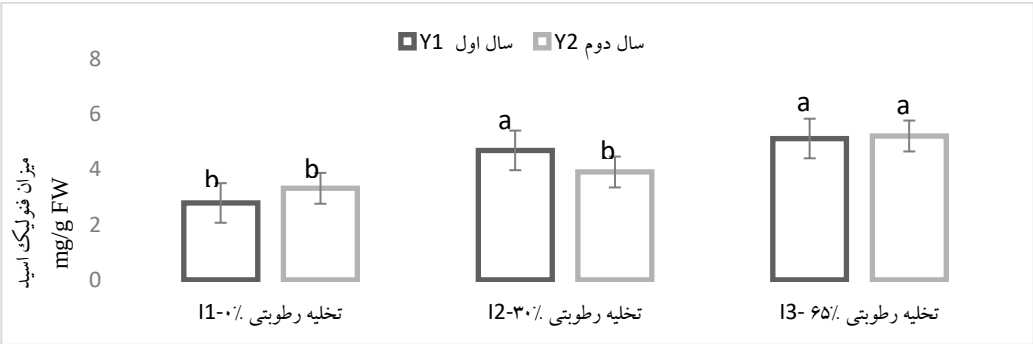
حروف متفاوت در هر ستون نشان دهنده وجود اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها بر اساس آزمون مقایسه میانگین LSD است. * فقط مقایسه میانگین صفات در فصول رشدی که برهمکنش آنها با سال معنی‌دار شده بود، آورده شد.

Different letters in each column indicate significant differences by LSD analysis. Only parameters with significant interaction effects with the year in specific growth seasons are included.



شکل ۱- مقایسه میانگین برهمکنش رقم (C; Paros, Queen Eliza) و سال (Y; Y_2 & Y_1) ، با ملاحظه انحراف استاندارد بر مقدار فنولیک‌اسید بافت برگ توت‌فرنگی. وجود حروف مشابه در هر سری از میانگین‌ها، نشان دهنده نبود اختلاف معنی‌دار، در سطح احتمال۱ درصد با آزمون LSD است. خطوط افقی بالای هر ستون نشان‌دهنده انحراف استاندارد است (n=۱۲).

Figure 1. Mean comparison of interaction effects of cultivar (Paros & Queen Eliza) and year (Y1 &Y2) considering the standard deviation on leaf phenolic acid content in strawberry plant. The presence of different letters in each series of averages indicates a significant difference at 1% probability level based on LSD (Least Significant Difference) test. The horizontal lines above each column indicate the standard deviation (n=12).



شکل۲- مقایسه میانگین برهمکنش تیمارکم‌آبیاری (I; I_1, I_2 & I_3) و سال (Y; Y_2 & Y_1) با ملاحظه انحراف استاندارد بر مقدار فنولیک‌اسید بافت برگ توت فرنگی. وجود حروف مشابه در هر سری از میانگین‌ها، نشان دهنده نبود اختلاف معنی‌دار، در سطح احتمال۱ درصد با آزمون LSD است. خطوط افقی بالای هر ستون نشان‌دهنده انحراف استاندارد است (n=۱۲)

Fig. 2. Mean comparison of interaction effects of deficit irrigation (I; I_1, I_2 & I_3) and year (Y_1 &Y_2) considering the standard deviation on leaf phenolic acid content in strawberry plant. The presence of different letters in each series of averages indicates a significant difference at 1% probability level based on LSD (Least Significant Difference) test. The horizontal lines above each column indicate the standard deviation (n=12).

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2025-07-09]

نتیجه گیری

مرور کلی نتایج نشان داد که در تنش ملایم کم‌آبی (تیمار ۳۰ درصد تخلیه‌رطوبتی)، شاخص‌های بیوشیمایی میوه حفظ و حتی بهبود پیدا کردند. برای مثال تحت تاثیر تنش ملایم کم‌آبی، مقادیر بالاتری از مواد جامد محلول، ویتامین ث، فلاونوئید و مواد فنلی تولید و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی میوه افزایش نشان‌داد. در مرحله رویش بهاره تغییرات افزایشی در میزان ظرفیت آنتی‌اکسیدانی، فنل، فلاونوئید و ویتامین ث مشاهده و در مرحله رویش تابستانه و پاییزه تغییرات افزایشی و معنی‌دار بیشتر در میزان پرولین، کربوهیدرات محلول، مالون دی‌آلدئید و آسکوربات دیده شد. درصد بالاتر مواد آنتی‌اکسیدانی آنزیمی و غیرآنزیمی در رقم توت‌فرنگی کویین‌الیزا، نقش این رقم را برای کاشت در مناطق شمال‌غربی و حاشیه زاگرس تحت تنش ملایم کم‌آبیاری، برجسته می‌سازد. رقم کویین‌الیزا با درصد بالاتری از مواد جامد محلول، آسکوربات، گلوتاتیون، فنولیک‌اسید و فنیل‌آلانین‌آمونالیاز و پلی‌فنل‌اکسیداز، از برتری بالاتری برخوردار است.

سپاسگزاری

بدینوسیله ضمن تشکر از حمایت های مالی، علمی و معنوی دانشگاه زنجان، از دانشگاه کردستان، اداره کل هواشناسی کردستان، اداره کل استاندارد کردستان و موسسه تحقیقات علوم باغبانی کشور نیز به جهت در اختیار قرار دادن آزمایشگاه و برخی از مواد شیمیایی تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع References

Ahmadi, A., & Ceiocemardeh, A. (2004). Effect of drought stress on soluble carbohydrate, chlorophyll and Proline in four adopted wheat cultivars with various climate of Iran. *Iran Journal of Agricultural Science, 35*, 753-763.

Ariza, M. T., Miranda, L., Gómez-Mora, J. A., Medina, J. J., Lozano, D., Gavilán, P., & Martínez-Ferri, E. (2021). Yield and fruit quality of strawberry cultivars under different irrigation regimes. *Agronomy, 11*, 261.

Anonymous. (2022). Agricultural Statistics Information. Ministry of Agricultural Jihad, Iran. Volume 3. *Horticultural Products*. (In Persian).

Babaei, S., Ahmadi, S., Tahmasebi, I., & Sarseyfi, M. (2022). Efficacy of chemical and non-chemical weed control approaches in strawberry (*Fragaria ananassa*) fields in Kurdistan. *Iranian Journal of Weed Science, 18*, 11-22. (In Persian).

Bandeoglu, E., Egidogan, F., Yucel, M., & Avni Oktem, H. (2004) Antioxidant responses of shoots and roots of lentil to NaCl salinity stress. *Plant Growth Regulation, 42*, 69-77.

Bor, J. Y., Chen, H. Y., & Yen, G. C. (2006). Evaluation of antioxidant activity and inhibitory effect on nitric oxide production of some common vegetables. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 54*, 1680-1686.

Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry, 72*, 248-254.

Capitani, F., Biondi, S., Falasca, G., & Ziosi, V. (2005). Methyl jasmonate disrupts shoot formation in tobacco thin cell layers by over-inducing miotic activity and cell expansion. *Planta, 22*, 507-519.

Chiabrando, V., & Giacalone, G. (2016). Effects of edible coatings on quality maintenance of fresh cut nectarines. *Journal of Food and Agriculture, 28*: 201.

Da Silva, F. L., Escribano-Bailón, M. T., Alonso, J. J. P., Rivas-Gonzalo, J. C., & Santos-Buelga, C. (2007). Anthocyanin pigments in strawberry. *LWT-Food Science and Technology, 40*, 374-382.

D'Cunha, G. B., Satyanarayan, V., & Nair, P. M. (1996). Purification of phenylalanine ammonia lyase from Rhodotorula glutinis. *Phytochemistry, 42*, 17-20.

Ebrahimie, E., Habashi, A., Ghareyazie, B., Ghannadha, M., & Mohammadie, M. (2003). A rapid and efficient method for regeneration of plantlets from embryo explants of cumin (*Cuminum cyminum*). *Plant Cell, Tissue and Organ Culture, 75*, 19-25. (In Persian).

Ebrahimzadeh, M.A., Nabavi, S.F., Nabavi Eslami, S.M., & B. (2010). Antihemolytic and antioxidant activities of Allium paradoxum. *Central European Journal of Biology, 5*, 338-345.

Falguera, V., Quintero, J. P., Jiménez, A., Muñoz, J. A., & Ibarz, A. (2011). Edible films and coatings: structures, active functions and trends in their use. *Journal of Food Science and Technology, 22*, 292-303.

Fatemi, L.S., Tabatabaei, S.J., & Fallahi, E. (2009). The effect of silicon on the growth and yield of strawberry grown under saline conditions. *Journal of Horticulture Science, 23*, 88-95.

Ghaderi, N., & Siosemardeh, A. (2011). Response to drought stress of two strawberry cultivars (cv. Kurdistan and Selva). *Horticulture, Environment, and Biotechnology, 52*, 6-12. (In Persian).

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2025-07-09]

Ghaderi, N., & Siosemardeh, A. (2013). Effect of Water Stress on Some Physiological Characteristics in Three Strawberry Cultivars. *Iranian Journal of Horticultural Science, 44*, 129-136. (In Persian).

Ghannoum, O. (2008). C4 photosynthesis and water stress. *Annals of Botany, 103*, 4. 635-644.

Gharibi, S., Tabatabaei, B. E. S., Saeidi, G., Talebi, M., & Matkowski, A. (2019). The effect of drought stress on polyphenolic compounds and expression of flavonoid biosynthesis related genes in *Achillea pachycephala* Rech. *Phytochemistry, 162*, 90-98.

Ghasemnezhad, A., Ghasemi, Y., Hemati, Kh., Ebrahimzadeh, M.A., & Ghasemi, K. (2012). Effect of type of rootstock and fruit tissue on some chemical properties of page mandarin and thampson novel orange. *Journal of Plant Production, 19*, 43-54.

Ghorbani, A., Zarinkamar, F., & Fallah, A. (2009). The effect of cold stress on the morphologic and physiologic characters of two rice varieties in seedling stage. *Journal of Crop Breeding, 1*, 50-66

Gill, S. S. & Tuteja, N. (2010). Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology and Biochemistry Journal, 48*, 909-930.

Gillespie, K.M., & Ainsworth, E.A. (2007). Measurement of reduced, oxidized and total ascorbate content in plants. *Nature Protocols, 2*, 871-4.

Grant, O. M., Johnson, A. W., Davies, M. J., James, C. M., & Simpson, D. W. (2010). Physiological and morphological diversity cultivated strawberry *(Fragaria × ananassa)* in response to water deficit. *Environmental and Experimental Botany, 68*, 264-272.

Hayat, S., Hayat, Q., Alyemeni, M.N., Wani, A.S., Pichtel, J., & Ahmad, A. (2012). Role of proline under changing environments: a review. *Plant Signaling & Behavior, 7*, 11, 1456-1466.

Iranzo, B., Pertegaz, J. C., & Balsalobre, A. P. (1984). Characterization and measurement of astringency and tannin content in Rojo Brillanteg persimmon quality and systems. *Acta Horticulturae, 601*, 227-231.

Kaijv, M., Sheng, L., & Chao, C. (2006). Antioxidation of flavonoids of Green Rhizome. *Food Science, 27*, 110-115.

Khan, W., Prithiviraj, B., & Smith, D.L. (2003). Photosynthetic responses of corn and soybean to foliar application of salicylates. *Journal of Plant Physiolgi,160*, 5. 485-492.

Kinnersley, A.M., & Turano, F.J. (2000). Gamma aminobutyric acid (GABA) and plant responses to stress. *Critical Reviews in Plant Sciences, 19*, 479-509.

Medda, S., Dessena, L., & Mulas, M. (2020). Monitoring of the PAL enzymatic activity and polyphenolic compounds in leaves and fruits of two myrtle cultivars during maturation. *Agriculture, 10*, 389.

Liu, F., Savić, S., Jensen, C.R., Shahnazari, A., Jacobsen, S.E., Stikić, R., & Andersen, M.N. (2007). Water relations and yield of lysimeter-grown strawberries under limited irrigation, *Scientia Horticulturae, 111*, 128-132.

Li, F., Xie, Y., Zhang, C., Chen, X., Song, B., Li, Y., Tang, Y., & Hu, J. (2014). Increased density facilitates plant acclimation to drought stress in the emergent macrophyte Polygonum hydropiper. *Ecological Engineering, 71*, 66-70.

Li., L., & Wang, Y. (2023). Independent and combined influence of drought stress and nitrogen deficiency on physiological and proteomic changes of barley leaves. *Environmental and Experimental Botany, 210*, 105346

Perin, E.C., Messias, R.S., Borowski, J.M., Crizel, R.L., Schott, I.B., Carvalho, I.R., Rombaldi, C.V., & Galli, V. (2019). ABA-dependent salt and drought stress improve strawberry fruit quality. *Food Chemistry, 271*, 516-526.

Pineli, L., Moretti, C.L., Santos, M.S., Campos, A.B., Brasileiro, A.V., Córdova, A.C., & Chiarello, M.D. (20211). Antioxidants and other chemical and physical characteristics of two strawberry cultivars at different ripeness stages. *Journal of Food Composition and Analysis, 24*, 11-16.

Ranjbar, A., Rabiei, V., & Karami, F. (2014). Evaluation and selection of suitable strawberry cultivar for open field planting in Kurdistan province in Iran. *Plant Breeding and Seed Production, 30-2*, 351-355.

Rezayian, M., Niknam, V., & Ebrahimzadeh, H. (2018). Improving tolerance against drought in canola by penconazole and calcium. *Pesticide Biochemistry and Physiology, 149*, 123-136.

Salbitani, G., Bottone, C., & Carfagna, S. (2017). Determination of Reduced and Total Glutathione Content in Extremophilic Microalga Galdieria phlegrea. *Bio-protocol, 7*, e2372.

Scalzo, J., Politi, A., Pellegrini, N., Mezzetti, B., & Battino, M. (2005). Plant genotype affects total antioxidant capacity and phenolic contents in fruit. *Nutrition, 21*, 207-213.

Şener, S., Sayğı, H., & Duran, C.N. (2023). Responses of In Vitro Strawberry Plants to Drought Stress under the Influence of Nano-Silicon Dioxide. *Sustainability, 15*,15569.

Shahnazari, A., & Rezaiyan, M. (2015). Effect of regulated deficit irrigation (RDI) and partial root zone drying (PRD) on quantitative and qualitative traits of strawberry. *Water and Soil, 29*, 820-827.

Sharma, R.R., Singh, C.N., & Goswami, A.M. (2001). Polyphenol oxidase activity in mango (*Mangifera indica* L.) in relation to flowering behavior and the malformation incidence. *Fruits, 56*, 219-224.

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2025-07-09]

Sharova, E.I., Smolikova, G.N., & Medvedev, S.S. (2023). Determining Hydrogen Peroxide Content in Plant Tissue Extracts. *Russian Journal of Plant Physiology, 70*, 216.

Sun, C., Li, X., Hu, Y., Zhao, P., Xu, T., Sun, J., & Gao, X. (2015). Proline, sugars, and antioxidant enzymes respond to drought stress in the leaves of strawberry plants. *Horticultural Science and Technology, 33*, 625-632.

Wagner, G.J. (1979). Content and vacuole extravacuole distribution of neutral sugars, free amino acids and anthocyanin in protoplasts. *Plant Physiology, 64*, 88-93.

Weber, N., Schmitzer, V., Jakopic, J., & Stampar, F. (2018). First fruit in season: seaweed extract and silicon advance organic strawberry (*Fragaria×ananassa* Duch.) fruit formation and yield. *Scientia Horticulturae, 242*, 103-109.

Zahedi, S.M., Hosseini, M.S., Hoveizeh, N.F., Kadkhodaei, S., & Vaculík, M. (2023). Comparative morphological, physiological and molecular analyses of drought-stressed strawberry plants affected by SiO_2 and SiO_2-NPs foliar spray. *Scientia Horticulturae, 309*, 111686.

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2025-07-09]

Iranian Journal of Horticultural Science and Technology 25 (3): 303-318 (2024)
Research article

Evaluation of Biochemical and Antioxidant Changes of Two Strawberries (Paros and Queen Eliza) Cultivars under Deficit Irrigation Conditions

Mohammad Sarsaifee,[1] Ali Solamani,[1] Esmaail Amiri,[1] Naser Ghaderi[2]
1- Department of Horticultural Sciences, University of Zanjan, Zanjan, Iran.
2- Department of Horticultural Sciences, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.
* Corresponding author: E-mail: (asoleimani@znu.ac.ir)

The current study aimed to investigate the impact of water deficit treatment on the antioxidant and biochemical properties of the fruits and leaves of two strawberry cultivars, namely *Fragaria* × *ananassa* Duch. 'Paros' and 'Queen Eliza'. The study was conducted over two consecutive years (2019–2020) and across different growing seasons-spring, summer, and autumn-to gain a comprehensive understanding of the plants' responses to water stress. The experiment was carried out in a split-plot design with a completely randomized block layout at the agricultural research station in Graze, Sanandaj City. The study included three levels of irrigation: 0%, 30%, and 65% soil moisture depletion, applied in a hilling planting system with drip irrigation in a soil bed. The results of the study revealed that the lowest amount of ascorbate (44.8 mmol/g DW) was observed in the control treatment, while the highest amount (73.5 mmol/g DW) was observed in the severe water stress treatment. Similarly, the amount of glutathione (in mmol/g DW) in the severe water stress treatment showed an increase of approximately 74% compared to the control treatment. Furthermore, our findings indicated that the contents of polyphenol oxidase (PPO) and phenylalanine ammonia-lyase (PAL) significantly increased with the increase in water stress treatment in strawberry leaves. The highest amounts of PAL (43.3 protein units per mg) and PPO (0.58 protein units per mg) were observed in the severe water stress treatment during the summer season. The antioxidant capacity, as well as the total phenol and flavonoid content, exhibited an increase with rising water stress levels. Under severe water stress conditions, the amounts of these parameters increased by 35%, 48%, and 92%, respectively, compared to the control. The interaction effect of cultivar and year on PAL enzyme and phenolic acid content was significant, particularly in the summer and autumn seasons. The mean comparison test showed that the highest amounts of these characteristics were observed in 'Queen Eliza', with 41.67 units per mg of protein and 4.80 mg/g FW, respectively. Overall, the biochemical characteristics of the fruit were maintained and improved under low-stress deficit irrigation treatment. The changes in characteristics in leaves and fruits also indicated that 'Queen Eliza' had higher tolerance compared to the other cultivar.

Keywords: Antioxidant properties, Drought stress, Polyphenols, Strawberry, Proline.

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2025-07-09]