نشریه تولید و فرآوری محصولات زراعی و باغی
سال دوازدهم / شماره چهارم / زمستان ۱۴۰۱/مقاله علمی-پژوهشی: صفحات ۹۷ تا ۱۱۶

پاسخ توت‌فرنگی رقم سابرینا کشت شده در شرایط کم محلول‌دهی بر محلول‌پاشی نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم

پریسا صادقی[۱] و حمید حسن پور[۲*]

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۰۸ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۶)

چکیده

توت‌فرنگی با نام علمی Dutch *Fragaria× ananassa* از خانواده گلسرخیان، جزء میوه‌هایی است که به‌دلیل عطر، طعم و ارزش غذایی بالا در سراسر جهان پرورش می‌یابد. در این مطالعه، اثر متقابل نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم (۰، ۶ و ۱۲ میلی‌گرم بر لیتر) و کم محلول‌دهی (۹۰، ۱۱۰ و ۱۳۰ میلی‌لیتر) بر برخی صفات مورفولوژی، آنتی اکسیدانی و فیتوشیمیایی توت‌فرنگی رقم سابرینا از جمله عرض، طول و وزن میوه، عملکرد، محتوای فنل کل و فلاونوئید کل، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، محتوی آسکوربیک اسید، آنتوسیانین کل و عناصر روی و آهن مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که اثر متقابل نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم و کم محلول‌دهی بر عرض، طول و وزن میوه، عملکرد میوه، محتوای آسکوربیک اسید و آهن و همچنین فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی معنی‌دار بود. بیشترین میزان طول میوه (۴/۷۳ سانتی‌متر)، عرض میوه (۳/۷۱ سانتی‌متر)، وزن میوه (۵۲/۲ گرم)، عملکرد میوه (۵۲۷ گرم در بوته) و آسکوربیک اسید (۵۱/۱ میلی‌گرم بر ۱۰۰ میلی‌لیتر آب میوه) در تیمار کم محلول‌دهی ۱۳۰ میلی‌لیتر و نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم ۱۲ میلی‌گرم بر لیتر مشاهده شد. در مقابل، بیشترین میزان فعالیت آنزیم‌های کاتالاز (۱/۹۶ واحد بر گرم وزن تر)، گایاکول پراکسیداز (۲/۴۲ واحد بر گرم وزن تر میوه) و آسکوربات پراکسیداز (۲/۲۹ واحد بر گرم وزن تر) در تیمار کم محلول‌دهی ۹۰ میلی‌لیتر و نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم ۱۲ میلی‌گرم بر لیتر به‌دست آمد. به‌طورکلی نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که در شرایط کم محلول‌دهی استفاده از نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم می‌تواند ویژگی‌های مورفولوژی و فیتوشیمیایی توت فرنگی را بهبود بخشند.

واژه‌های کلیدی: آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، عناصر معدنی، محتوای فنل کل، کاتالاز، محتوی آنتوسیانین کل

۱ و ۲. به‌ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد و دانشیار گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی:ha.hassanpour@urmia.ac.ir

مقدمه

توت‌فرنگی (*Fragaria× ananassa, Dutch.*) گیاهی از خانواده گلسرخیان است که به‌دلیل عطر، طعم و ارزش غذایی بالای میوه آن، مصرف زیادی در سراسر جهان دارد (۳۷). توت‌فرنگی از لحاظ گیاه‌شناسی، گیاهی چند ساله و علفی بوده و به‌طور متوسط ۵ – ۳ سال عمر می‌کند. میوه توت‌فرنگی به‌دلیل داشتن آسکوربیک اسید، فنل‌ها، فلاونوئیدها و آنتوسیانین دارای خواص آنتی‌اکسیدانی طبیعی است و نقش مهمی در سلامتی انسان ایفا می‌کنند (۳۸). ارقام مختلفی از توت‌فرنگی در گلخانه‌ها کشت و کار می‌شوند که یکی از مهم‌ترین آن‌ها رقم سابرینا است. توت‌فرنگی رقم سابرینا دارای خصوصیاتی از قبیل روزکوتاهی، پرگل بودن، طعم شیرین میوه، ماندگاری و انبارداری بالا، عملکرد زیاد، یکدست بودن میوه، سفت و گوشتی بودن بافت میوه و وزن بالای میوه نسبت به ارقام دیگر، عدم نیاز به زنبور گلخانه‌ای، مقاومت به آفاتی چون کنه و بیماری‌های قارچی است که سبب استقبال بالای کشاورزان نسبت به کشت این رقم شده است (۱۷). اگرچه در اکثر نقاط ایران می‌توان کشت توت‌فرنگی انجام داد (میزان عملکرد آن در کشور حدود ۷۰۰–۳۰۰ گرم در هر بوته است)، با این‌حال، کمبود آب و افزایش رقابت بین بخش‌های مختلف (کشاورزی، صنعتی و خانگی) در برابر تحلیل رفتن منابع آب، تولیدکنندگان را به‌ویژه در مناطق با تولید کشاورزی متمرکز مجبور می‌کند تا روش‌های صرفه جویی در مصرف آب را پیگیری کنند. تنش خشکی به‌طورکلی به‌عنوان یک عامل منفی در کشاورزی در نظر گرفته می‌شود، زیرا این امر باعث افت شدید عملکرد می‌شود. به‌طورکلی تنش خشکی از طریق کاهش سطح برگ، بسته شدن روزنه‌ها، کاهش هدایت روزنه‌ای، کاهش آبگیری کلروپلاست، کاهش سنتز پروتئین و کلروفیل سبب تقلیل فرایند فتوسنتز می‌شود. در شرایط تنش آب، انتقال مواد فتوسنتزی کاهش یافته و سبب اشباع برگ‌ها از این مواد می‌شود که این نیز می‌تواند فتوسنتز را محدود نماید، بدیهی است که با محدود شدن فرآورده‌های فتوسنتزی رشد گیاه و در نهایت عملکرد آن دچار کاهش می‌شود (۲۰).

با توجه به موقعیت بخش کشاورزی در ایران، حفظ جایگاه و افزایش سهم از بازار جهانی، مستلزم افزایش کیفیت و کمیت محصولات کشاورزی تولیدی است و بدون شک برای تحقق این امر بهره گیری از فناوری‌های نوین از جمله فناوری نانو در این حوزه، اجتناب ناپذیر است. استفاده از کودها به روش محلول پاشی روی برگ کمتر از کاربرد خاکی آن‌ها موجب آلودگی محیط زیست می‌شود و مقدار کود کمتری نیز نیاز است. روش‌های کاربرد کودهای ریز مغذی برای به‌دست آوردن بهترین نتیجه بسیار مهم هستند (۹). تیتانیوم (Ti) به‌عنوان یک عنصر سودمند می‌تواند باعث افزایش رشد گیاه شده و جذب برخی از عناصر نظیر نیتروژن، فسفر، کلسیم، منیزیم، آهن، منگنز و روی را تحریک کرده و محصول‌دهی گیاهان را افزایش دهد (۴۱).

به گزارش شارما و همکاران (۳۴)، کم آبیاری اگر چه عملکرد محصول را کاهش می‌دهد ولی ممکن است به‌طور معنی‌داری در مصرف آب صرفه‌جویی شود و اثرات مثبتی در افزایش کیفیت داشته باشد. نقش بیولوژی تیتانیوم در رشد، نمو و متابولیسم گیاه از سال‌ها پیش مورد مطالعه قرار گرفته است. آلکارز و همکاران (۴) دریافتند که بیوماس، باروری و کیفیت میوه‌ی هلو با محلوپاشی تیتانیوم در مرحله شروع دوره رشد و شکوفه‌دهی تحریک می‌شوند. زرافشار و همکاران (۴۱) اثر محلول‌پاشی دی اکسید تیتانیوم بر تعدیل اثرات مخرب تنش خشکی در گلابی وحشی (*Pyrus biosseriana* buhse) را مورد بررسی قراردادند. تیمارهای اعمال شده شامل محلول پاشی نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم با غلظت‌های ۲۰، ۴۰، ۸۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر، بعد از آخرین آبیاری بر برگ‌های نهال بود. نتایج حاصل نشان داد که محلول‌پاشی نانوذرات تیتانیوم به‌ویژه با غلظت‌های کم (۲۰ و ۴۰ میلی‌گرم در لیتر) از طریق تعدیل تبادلات گازی وافزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، باعث تعدیل اثرات مخرب تنش خشکی می‌شود.

با توجه به اینکه، تاکنون در زمینه تأثیر نانو محرک دی–

اکسید تیتانیوم بر طول، عرض، وزن و عملکرد میوه و ویژگی‌های آنتی‌اکسیدانی و فیتوشیمیایی توت‌فرنگی رقم سابرینا در شرایط کم محلول‌دهی تحت سیستم کشت هیدروپونیک مطالعه‌ای انجام نشده است. لذا هدف از این مطالعه، بررسی تأثیر نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر برخی خصوصیات مورفولوژی، آنتی‌اکسیدانی و فیتوشیمیایی توت‌فرنگی رقم سابرینا در شرایط تنش کم محلول‌دهی است.

مواد و روش‌ها

تهیه مواد گیاهی و نحوه اجرای آزمایش

این پژوهش به‌صورت آزمایش گلخانه‌ای در گلخانه تحقیقاتی گروه علوم باغبانی دانشگاه ارومیه انجام گرفت (دما ۲۴-۱۸ درجه سیلسیوس، رطوبت نسبی ۶۵-۴۰ درصد و شدت نور ۳۰۰۰-۲۵۰۰ لوکس). آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. فاکتورهای آزمایشی شامل نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم در سه سطح (۰، ۶ و ۱۲ میلی‌گرم بر لیتر) و مقدار محلول غذایی در سه سطح (۹۰، ۱۱۰ و ۱۳۰ (شاهد) میلی‌لیتر) بود. ابتدا سیستم کشت هیدروپونیک طراحی و تنظیم شد. سپس با محاسبه میزان خروجی محلول از هز نازل و میزان نیاز هر بوته، زمان مورد نیاز برای محلول دهی محاسبه شده و به‌صورت خودکار به پای هر بوته پمپ شد. جهت اعمال تنش کم محلول‌دهی، ردیف اول (بدون تنش) با محلول دهی ۵ بار در روز (۱۳۰ میلی‌لیتر)، ردیف دوم محلول دهی ۴ بار در روز (۱۱۰ میلی‌لیتر) و ردیف سوم محلول دهی ۳ بار در روز (۹۰ میلی‌لیتر) استفاده شد. سپس نشاءهای توت‌فرنگی رقم سابرینا تهیه شده از مجتمع گلخانه‌ای و نشاء توت‌فرنگی صدیق‌نیا در ارومیه، پس از رفع نیاز سرمایی در مرحله چهار تا هشت برگی، در کیسه‌های کشت به طول ۱۱۰ سانتی‌متر و عرض ۳۵ سانتی متر و ظرفیت ۱۴ لیتر حاوی ۵۰ درصد کوکوپیت، ۲۵ درصد پیت‌ماس و ۲۵ درصد پرلیت کشت شدند (شکل ۱). هفته اول جهت استقرار بوته‌ها از آب، هفته دوم تا هفته ششم جهت رشد رویشی از محلول غذایی مخصوص این دوره (محلول هوگلند نیم‌غلظت) و از هفته هفتم تا پایان دوره برداشت بسته به مراحل گلدهی تا باردهی از محلول غذایی هوگلند تغییر یافته (جدول ۱) استفاده شد. نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم مورد استفاده در این آزمایش از شرکت پیشگامان نانو مواد ایرانیان (مشهد- ایران) تهیه شد. محلول پاشی غلظت‌های مختلف نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم از هفته چهاردهم تا هجدهم، هرهفته یک‌بار در ۵ نوبت انجام گرفت. سپس میوه‌هایی که بیش از ۷۰ درصد رنگ گرفته بودند، برداشت شده و صفات مورد نظر مورد ارزیابی قرار گرفتند.

طول، عرض و وزن میوه

وزن کل میوه‌های هر بوته پس از برداشت در طی دوره رشدی با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ گرم و همچنین طول و عرض کل میوه‌های هر بوته توسط کولیس دیجیتالی اندازه‌گیری شدند و بعد میانگین اعداد به‌دست آمده استفاده شد.

عملکرد

به‌منظور تعیین عملکرد، کل میوه بوته‌ها از مرحله شروع میوه-دهی تا پایان میوه‌دهی برداشت و با ترازوی دیجیتالی توزین شدند و در پایان مجموع وزن تمام میوه‌های هر بوته به عنوان عملکرد آن بوته بر حسب گرم محاسبه شد.

محتوی آسکوربیک اسید و آنتوسیانین کل

محتوی آسکوربیک اسید میوه‌های توت‌فرنگی بر طبق روش ماجدی (۲۲) و با روش تیتراسیون با ید در یدید پتاسیم در حضور معرف نشاسته ۱ درصد انجام گرفت. برای تعیین محتوی آسکوربیک اسید، ۵ میلی‌لیتر از آب میوه توت‌فرنگی در یک ارلن ۲۵۰ میلی‌لیتری ریخته شده و در حدود ۲۰ میلی‌لیتر آب مقطر به آن اضافه کرده و سپس با استفاده از محلول ید در یدید پتاسیم، در حضور ۲ میلی‌لیتر معرف نشاسته ۱ درصد تیتر شد. به محض مشاهده رنگ آبی عمل تیتر کردن متوقف شد. با توجه به حجم آب میوه اولیه، میزان آسکوربیک اسید برطبق

شکل ۱. کشت نشاهای توت‌فرنگی رقم سابرینا در کیسه‌های کشت حاوی ۵۰ درصد کوکوپیت، ۲۵ درصد پیت‌ماس و ۲۵ درصد پرلیت در شرایط گلخانه‌ای

جدول ۱. غلظت عناصر غذایی در محلول غذایی مورد استفاده برای تغذیه گیاهان توت فرنگی

غلظت (میلی‌گرم بر لیتر)	عناصر کم مصرف	غلظت (میلی‌گرم بر لیتر)	عناصر پرمصرف
۰/۶۷	بور (B)	۲۵۰	نیتروژن(N)
۰/۱۱	منگنز (Mn)	۳۲۵	پتاسیم (K)
۰/۱۳	روی (Zn)	۸۶	فسفر(P)
۰/۰۳	مس(Cu)	۱۱۰	کلسیم(Ca)
۰/۰۵	مولیبدن(Mo)	۳۲	گوگرد (S)
۳	آهن(Fe)	۳۴	منیزیوم (Mg)

فرمول زیر محاسبه شد:

$$\text{Ascorbic acid} = [(0.88 \times V1)(V2)] \times 100$$

Ascorbic acid= میزان آسکوربیک اسید بر حسب میلی‌گرم بر ۱۰۰ میلی‌لیتر آب میوه

V1= حجم ید در یدید پتاسیم مصرفی بر حسب میلی‌لیتر

V2= حجم آب میوه

۰/۸۸= عدد ثابت که نشان دهنده این هست که هر یک میلی‌لیتر ید ۰/۰۱ نرمال برابر با ۰/۸۸ میلی‌گرم آسکوربیک اسید است.

برای سنجش محتوی آنتوسیانین کل میوه‌های توت‌فرنگی تیمار شده، از روش اختلاف pH استفاده شد (۱۴) که بدین منظور دو بافر با pHهای ۴/۵ و ۱ مورد استفاده قرار گرفت. پس از تهیه بافرها، ۰/۲ گرم از بافت میوه با استفاده از ازت مایع در داخل هاون چینی کاملا پودر شده و سپس ۱۰ میلی‌لیتر متانول اسیدی ۱درصد (شامل متانول و کلریدریک اسید به نسبت ۹۹ به ۱) به آن اضافه و به‌خوبی ساییده شد. سپس عصاره ناهمگن حاصل با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ در ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۵ دقیقه و در دمای ۴ درجه سلیسیوس سانتریفیوژ شد. پس از سانتریفیوز، محلول رویی جمع‌آوری و میزان جذب آن در طول موج‌های ۵۲۰ و ۷۰۰ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر مدل Dynamica (HALODB-20) قرائت شد. در نهایت از فرمول زیر برای محاسبه مقدار آنتوسیانین کل بر حسب میلی‌گرم بر گرم سیانیدین تری گلیکوزید استفاده شد:

$$A = (A510 - A700\,nm)\,pH\,1 - (A510 - A700\,nm)\,pH\,4.5$$

ارزیابی محتوای فنل کل و فلاونوئید کل و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی

بدین منظور ابتدا با استفاده از روش حاجی مهدی‌پور و همکاران

(۱۳) عصاره‌گیری از میوه‌های توت‌فرنگی انجام شد. جهت اندازه‌گیری محتوای فنل کل، ۱۵میکرولیتر از عصاره به‌دست آمده با ۱۲۰۰میکرولیتر معرف فولین ۱۰ درصد داخل لوله‌های آزمایش ریخته شده و به آن ۹۶۰ میکرولیتر کربنات سدیم ۷ درصد افزوده شد. در مرحله آخر ۱۸۰ میکرولیتر آب مقطر به این مخلوط اضافه شد. پس از افزودن آب مقطر، لوله‌های آزمایش به مدت ۳۰–۴۰ دقیقه در تاریکی و در دمای اتاق قرار گرفتند. در نهایت میزان جذب نمونه‌ها در طول موج ۷۶۰ نانومتر با دستگاه اسپکتوفتومتر قرائت شد و محتوای فنل کل بر حسب میلی‌گرم گالیک اسید بر گرم وزن تر میوه گزارش شد (۳۵).

به‌منظور ارزیابی میزان فلاونوئید کل میوه‌های توت‌فرنگی تیمارهای مختلف، ۳۰ میکرولیتر از عصاره متانولی حاصل به ۱۵۰ میکرولیتر نیتریت سدیم ۵ درصد اضافه شده و مخلوط حاصل به مدت ۵ الی ۱۵ دقیقه در شرایط تاریکی قرار داده شد. پس از سپری شدن این مدت زمان، ۱۰۰۰ میکرولیتر محلول استات پتاسیم ۱ مولار و ۳۰۰ میکرولیتر محلول کلرید آلومینیوم ۱۰ درصد به آن اضافه نموده و جذب مخلوط در طول موج ۳۸۰ نانومتر قرائت شد و میزان فلاونوئید کل عصاره‌ها بر اساس میلی‌گرم کوئرستین بر گرم وزن تر گزارش شد (۵). همچنین در این پژوهش از شاخص دی‌پی‌پی‌اچ DPPH برای اندازه‌گیری ظرفیت آنتی‌اکسیدانی عصاره‌های حاصل از میوه توت‌فرنگی استفاده شد. ۱۵میکرولیتر از عصاره متانولی حاصل از هر نمونه در لوله آزمایش ریخته شده و به آن ۲ میلی‌لیتر از محلول DPPH (۰/۰۰۴ گرم پودر DPPH در ۱۰۰cc متانول ۸۰٪) اضافه شد. پس از ۱۵ تا ۳۰ دقیقه، میزان جذب هر یک از نمونه‌ها با استفاده از اسپکتروفتومتر مدل Dynamica (HALODB-20) در طول موج ۵۱۷ نانومتر قرائت و با استفاده از فرمول زیر فعالیت آنتی‌اکسیدانی تعیین شد (۶):

$$DPPH(\%) = \left[(AC - AS) / AC \right] \times 100$$

AC: میزان جذب شاهد AS : میزان جذب نمونه

ارزیابی فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی

ابتدا ۰/۵ گرم از میوه‌های تازه توزین و در ۲ میلی‌لیتر بافر استخراج (Tris-HCL ۰/۵ درصد و پلی وینیل پیرولیدون (PVP) ۰/۰۵ درصد و pH=۸) و بر روی یخ به مدت ۱۰ دقیقه خرد شد تا یک عصاره‌ی کاملاً همگن به‌دست آید. عصاره حاصل سانتریفیوژ شده و محلول رویی از رسوب با دقت جدا شده و به ویال‌های تمیز منتقل و دوباره سانتریفیوژ شد. در نهایت، ویال‌ها به‌آرامی از دستگاه سانتریفیوژ خارج شده و محلول رویی در چند ویال کوچک توزیع شد (۳۶). عصاره‌ی حاصل به‌منظور بررسی فعالیت آنزیم‌های گایاکول پراکسیداز (۲۱)، آسکوربات پراکسیداز (۲۶) و کاتالاز (۳) با دستگاه اسپکتوفتومتر مدل Dynamica (HALODB-20) مورد استفاده قرار گرفت.

ارزیابی میزان عناصر روی و آهن

به‌منظور تعیین میزان غلظت عناصر روی و آهن، نمونه‌های برگی تیمارهای مختلف در آون و در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت خشک شدند. مقدار ۴ گرم از هر یک از نمونه‌ها توزین و در داخل کوزه چینی ریخته و در کوره با دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده که در مدت زمان ۵ ساعت به خاکستر سفید رنگ تبدیل شد. سپس به خاکستر حاصل ۱۰ میلی‌لیتر اسید نیتریک یک درصد اضافه و حجم آن به ۲۵ میلی‌لیتر رسانده شد. در آخر مخلوط حاصل به کمک کاغذ صافی فیلتر شده و با استفاده از دستگاه جذب اتمی مدل Perkin Elmer Analyst 800 ساخت کشور آلمان میزان عناصر روی و آهن تعیین شد (۱۷).

تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از آزمایش

این آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملا تصادفی انجام شد. تجزیه و تحلیل‌های آماری داده‌ها با استفاده از نرم افزار آماری SAS نسخه ۹/۱ انجام شد و مقایسه میانگین‌ها نیز توسط آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

نتایج و بحث

طول و عرض میوه

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان می‌دهد که اثرات اصلی کم محلول‌دهی و نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر طول و عرض میوه در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود، اما اثرات

متقابل آن‌ها معنی‌دار نبود (جدول ۲). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که با افزایش غلظت نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم، طول میوه روند افزایشی داشت به‌طوری‌که بیشترین و کمترین طول میوه (۴/۷۳ و ۳/۳۲ سانتی‌متر) به‌ترتیب در تیمار ۱۲ میلی‌گرم در لیتر نانو دی‌اکسید تیتانیوم و شاهد به‌دست آمد (شکل a–۲). در تیمار کم محلول‌دهی نیز با کاهش میزان محلول، طول میوه روند کاهشی داشت. به‌طوری‌که بیشترین و کمترین طول میوه (۴/۶۷ و ۳/۲۴ سانتی‌متر) به‌ترتیب در تیمار ۱۳۰ و ۹۰ میلی‌لیتر کم محلول‌دهی دیده شد (شکل b–۲). در رابطه با عرض میوه نیز مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که با افزایش غلظت نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم، عرض میوه روند افزایشی داشت به‌طوری‌که بیشترین و کمترین عرض میوه (۳/۷۱ و ۲/۵۳ سانتی‌متر) به‌ترتیب در تیمار ۱۲ میلی‌گرم در لیتر نانو دی‌اکسید تیتانیوم و شاهد به‌دست آمد (شکل a–۳). در تیمار کم محلول‌دهی بیشترین و کمترین عرض میوه (به‌ترتیب ۴/۶۷ و ۳/۲ سانتی‌متر) به‌ترتیب در تیمار ۱۳۰ و ۹۰ میلی‌لیتر کم محلول‌دهی دیده شد و با کاهش میزان محلول‌دهی عرض میوه روند کاهشی داشت (شکل b–۳).

وزن میوه

جدول تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات اصلی کم محلول‌دهی، نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم و اثر متقابل آن‌ها بر وزن میوه در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که در شرایط کم محلول‌دهی، با افزایش غلظت نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم وزن میوه روند افزایشی داشت. نتایج نشان داد که بیشترین وزن میوه (۵۲/۲ گرم) در تیمار کم محلول‌دهی ۱۳۰ میلی‌لیتر و نانو دی اکسید تیتانیوم ۱۲ میلی‌گرم در لیتر و کمترین مقدار آن (۱۰/۶ گرم) در تیمار کم محلول‌دهی ۹۰ میلی‌لیتر و نانو دی اکسید تیتانیوم صفر میلی‌گرم در لیتر به‌دست آمد (شکل ۴).

عملکرد میوه

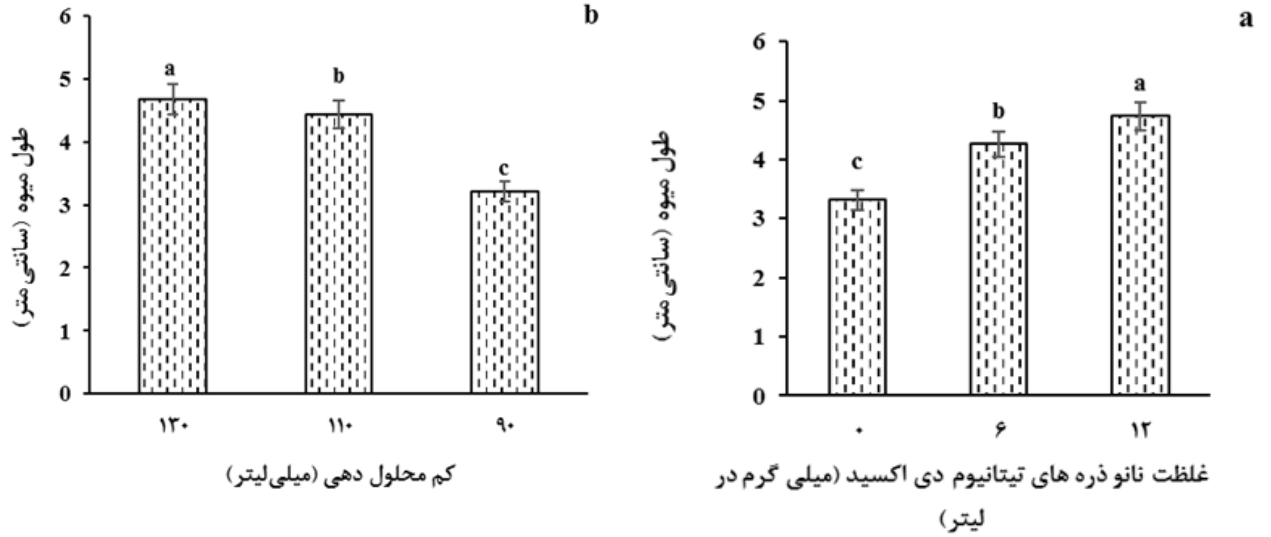
جدول تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات اصلی کم محلول‌دهی، نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم و اثر متقابل آن‌ها بر عملکرد میوه در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که با افزایش شدت تنش کم محلول‌دهی عملکرد میوه کاهش پیدا کرد ولی با افزایش غلظت نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم در شرایط کم محلول‌دهی، عملکرد میوه روند افزایشی داشت. به عبارت دیگر کاربرد نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم تا حدود زیادی از اثرات منفی تنش کم محلول‌دهی بر عملکرد میوه کاست. نتایج نشان داد که بیشترین عملکرد میوه (۵۲۷ گرم در بوته) در تیمار کم محلول‌دهی ۱۳۰ میلی‌لیتر و نانو دی‌اکسید تیتانیوم ۱۲ میلی‌گرم در لیتر و کمترین مقدار آن (۱۰۳ گرم در بوته) در تیمار کم محلول‌دهی ۹۰ میلی‌لیتر و نانو دی‌اکسید تیتانیوم صفر گرم در لیتر به‌دست آمد (شکل ۵).

بر اساس نتایج به‌دست آمده از این پژوهش، کم محلول‌دهی تأثیر منفی بر شاخص‌های رشدی میوه اعم از طول و عرض و وزن میوه و همچنین عملکرد داشت و با افزایش شدت تنش تغذیه‌ای، شاخص‌های یاد شده روند نزولی داشتند. درحالی‌که تیمار نانو دی‌اکسید تیتانیوم تأثیر مثبتی بر این شاخص‌ها داشت. کاربرد نانو دی‌اکسید تیتانیوم در شرایط کم محلول‌دهی منجر به کاهش اثرات سوء تنش کم محلول دهی شد. با افزایش غلظت نانو دی‌اکسید تیتانیوم در شرایط کم محلول‌دهی شاخص‌های رشدی میوه مانند طول، عرض و وزن میوه و همچنین عملکرد روند صعودی داشتند. تیتانیوم (Ti) نهمین عنصر غالب در پوسته زمین است و به‌عنوان یک عنصر سودمند می‌تواند باعث افزایش و تحریک رشد و جذب برخی از عناصر نظیر نیتروژن، فسفر، کلسیم، منیزیم، آهن، منگنز و روی شده و محصول‌دهی گیاهان را افزایش دهد (۲۹). افزایش طول، عرض و وزن میوه و عملکرد احتمالاً به‌دلیل گسترش سیستم ریشه‌ای گیاه در غلظت‌های بالای نانو دی‌اکسید تیتانیوم است که این امر به نوبه خود منجر به افزایش جذب عناصر غذایی، قدرت کلی گیاه و به دنبال آن رشد بهتر میوه‌ها می‌شود. مطابق پژوهش‌های قبلی، کم محلول‌دهی سبب کاهش اندازه میوه می‌شود. همچنین استفاده از نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم سبب افزایش عملکرد و طول و عرض میوه می‌شود. نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم

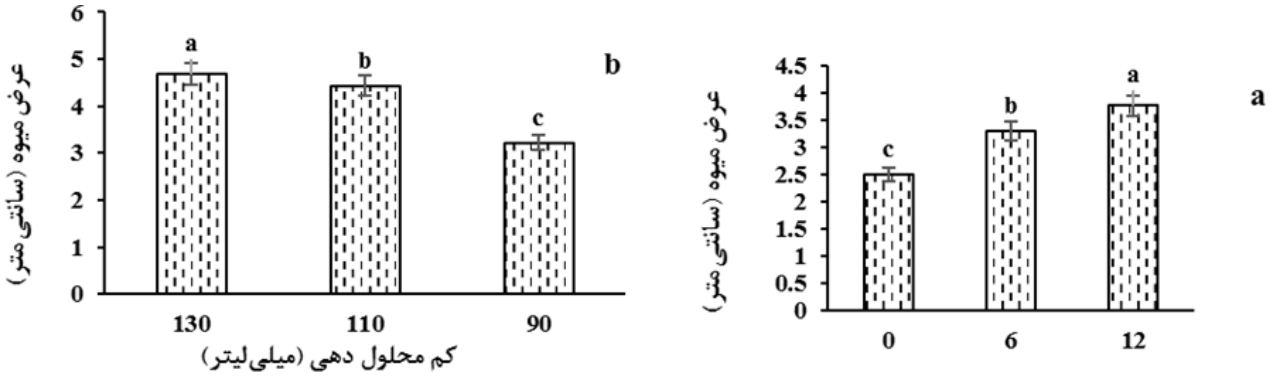
جدول ۲. تجزیه واریانس صفات کمی و کیفی اندازه‌گیری شده تحت تأثیر تیمار کم محلول‌دهی و نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم در توت‌فرنگی رقم سابرینا.

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات								
		طول میوه	عرض میوه	وزن میوه	عملکرد	آسکوربیک اسید	آنتوسیانین	محتوای فنل کل	فلاونوئید کل	فعالیت آنتی اکسیدانی
کم محلول‌دهی (a)	۲	۵/۴۹**	۴/۶۴**	۱۸۷۳**	۱۸۹۵۱۴**	۴۵/۶**	۱۹۹^{ns}	۱/۹۵**	۰/۴۳**	۴۵/۶**
نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم (b)	۲	۴/۷۲**	۳/۶۸**	۵۶۰**	۵۹۱۹۳**	۷/۵۰**	۶۲۰*	۱/۴۷**	۰/۰۶**	۷/۵۰**
اثر متقابل (a*b)	۴	۰/۰۹^{ns}	۰/۰۷^{ns}	۲۴/۶**	۲۷۹۶*	۳/۱۷**	۲۰/۵^{ns}	۰/۰۳۹^{ns}	۰/۰۲*	۳/۱۷**
اشتباه آزمایشی	۱۸	۰/۱۴	۰/۱۰۵	۵/۲۷	۶۲۴	۰/۰۵۵	۱۴۵	۰/۰۲	۰/۰۰۴	۰/۵۱
ضریب تغییرات (CV %)		۹/۰۴	۱۰/۲	۷/۵۰	۸/۲۴	۱/۵۲	۴۴/۷	۷/۹۸	۶/۴۴	۱/۶۳

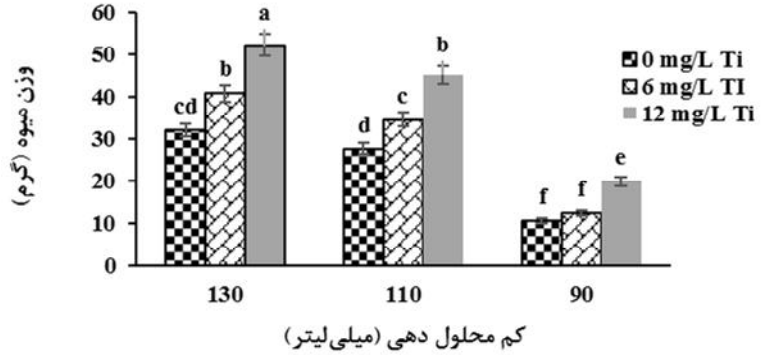
ns، * و **: به‌ترتیب غیر معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال پنج و یک درصد هستند.



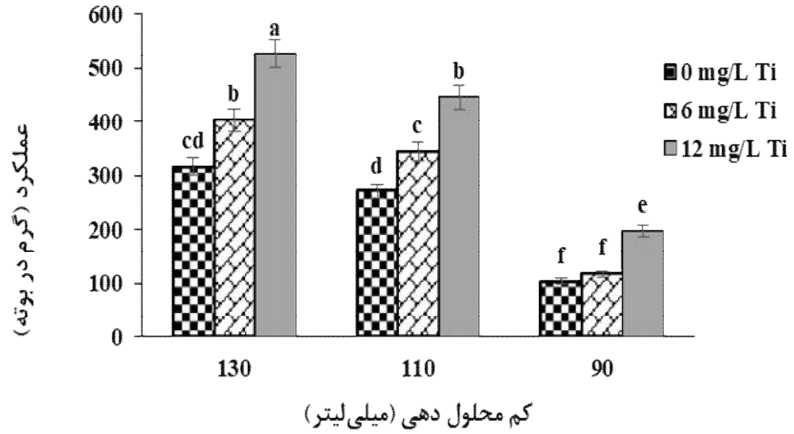
شکل ۲. مقایسه میانگین اثرات ساده نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم (a) و کم محلول‌دهی (b) بر طول میوه توت فرنگی رقم سابرینا. حروف غیرمشابه نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد در بین میانگین‌ها در آزمون دانکن است.



شکل ۳. مقایسه میانگین اثرات ساده نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم (a) و کم محلول‌دهی (b) بر عرض میوه توت فرنگی رقم سابرینا. حروف غیرمشابه نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد در بین میانگین‌ها در آزمون دانکن است.



شکل ۴. مقایسه میانگین اثرات متقابل نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم و کم محلول‌دهی بر وزن میوه توت فرنگی رقم سابرینا. حروف غیرمشابه نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد در بین میانگین‌ها در آزمون دانکن است.

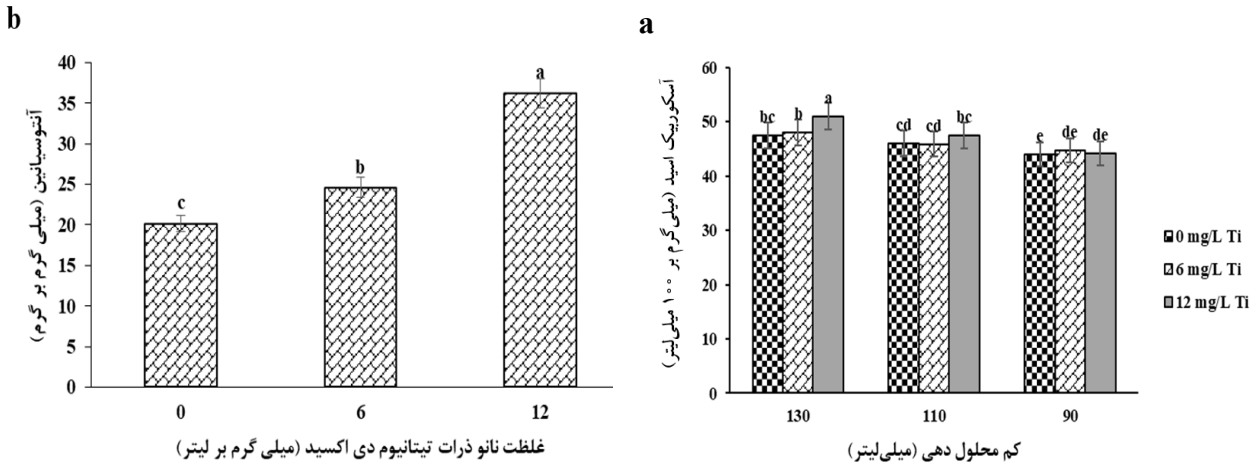


شکل ۵. مقایسه میانگین اثرات متقابل نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم و کم محلول‌دهی بر عملکرد میوه توت فرنگی رقم سابرینا. حروف غیرمشابه نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد در بین میانگین‌ها در آزمون دانکن است.

توانایی گیاه را در جذب آب افزایش داده و به این طریق قدرت سیستم ریشه را در جذب آب و مواد غذایی بالا برده و تشکیل اسیدآمینه‌های ضروری را افزایش می‌دهد (۴۲). آلکاراز و همکاران (۴) در سال ۲۰۰۳ با محلول‌پاشی تیتانیوم بر روی درختان هلو گزارش کردند که تیتانیوم با افزایش فعالیت آهن در کلروپلاست برگ و کروموپلاست میوه و افزایش جذب مواد غذایی، سبب افزایش طول و عرض میوه می‌شود. با توجه به نتایج، می‌توان گفت که با افزایش میزان کم محلول‌دهی از وزن میوه‌ها کاسته شده ولی با افزایش غلظت نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم وزن میوه‌ها بیشتر شده است و همچنین عملکرد افزایش یافته است. کاهش وزن میوه احتمالاً به‌دلیل کاهش رشد گیاه و فتوسنتز همراه با پیری برگ‌ها در اثر تنش به گیاه است، همچنین نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم باعث افزایش جذب آب و عناصر معدنی توسط ریشه می‌شوند (۴۳)، بنابراین با افزایش جذب آب توسط گیاه آب بیشتری وارد میوه می‌شود و چون وزن میوه تابعی از میزان آب موجود در آن است، بنابراین با افزایش جریان آب به سمت میوه، اندازه و وزن آن بالا خواهد رفت و در نهایت عملکرد افزایش پیدا می‌کند.

محتوی آسکوربیک اسید و آنتوسیانین کل

نتایج به‌دست آمده از تجزیه واریانس داده‌ها نشان می‌دهد که اثر متقابل کم محلول‌دهی و نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر میزان آسکوربیک اسید میوه توت فرنگی در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). مقایسه میانگین داده‌ها نیز نشان داد که با افزایش شدت تیمار کم محلول‌دهی محتوی آسکوربیک اسید کاهش پیدا کرد. کاربرد تیمار نانو دی‌اکسید تیتانیوم در شرایط کم محلول‌دهی تا حدودی از کاهش زیاد آسکوربیک اسید کاسته بود و تأثیر نانو ذرات در کم محلول‌دهی ۱۳۰ میلی‌لیتر در مقایسه با سایر تیمارها بیشتر بود. به‌طوری‌که بیشترین میزان آسکوربیک اسید (۵۱/۱ میلی‌گرم در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب میوه) در تیمار ۱۲ میلی‌گرم بر لیتر نانو دی‌اکسید تیتانیوم و کم محلول‌دهی ۱۳۰ میلی‌لیتر به‌دست آمد. کمترین میزان آسکوربیک اسید (۴۴/۱ میلی‌گرم در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب میوه) نیز در غلظت صفر نانو دی اکسید تیتانیوم و کم محلول‌دهی ۹۰ میلی‌لیتر دیده شد (شکل a–۶). همچنین با توجه به نتایج تجزیه واریانس، اثر متقابل کم محلول‌دهی و غلظت‌های مختلف نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر میزان آنتوسیانین کل معنی‌دار نبود ولی اثر ساده غلظت‌های مختلف نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود. مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیشترین (۳۶/۲ میلی‌گرم بر گرم) و کمترین (۲۰/۱ میلی‌گرم بر گرم) محتوی آنتوسیانین کل به‌ترتیب در غلظت‌های۱۲ و صفر (شاهد) میلی‌گرم بر لیتر نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم



شکل ۶. مقایسه میانگین اثر متقابل نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم و کم محلول‌دهی بر میزان آسکوربیک اسید (a) و اثر ساده نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر محتوی آنتوسیانین کل (b) توت‌فرنگی رقم سابرینا

حروف غیرمشابه نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد در بین میانگین‌ها در آزمون دانکن است.

به‌دست آمد. مطابق نتایج، با افزایش غلظت نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم استفاده شده در این پژوهش بر محتوی آنتوسیانین کل نیز افزوده شده است (شکل b–۶).

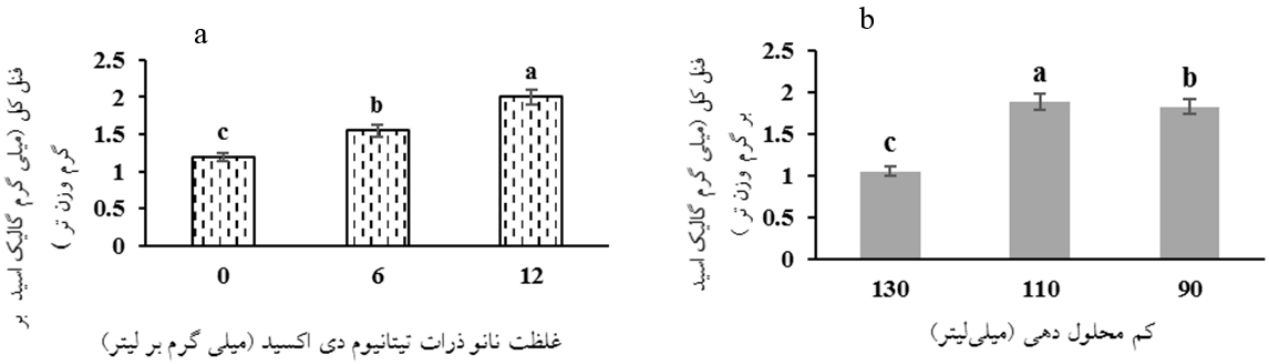
آنتوسیانین‌ها متعلق به ترکیبات فنلی با توزیع گسترده در گیاهان هستند که معمولاً در میوه، گل و قسمت‌های رویشی گیاهان حضور دارند. آنتوسیانین‌ها گلیکوزید و آسیل گلیکوزیدهایی از سیانیدین‌ها هستند و نقش مهمی در فیزیولوژی گیاهان دارند و مهمترین رنگیزه در توت فرنگی به حساب می‌آید. گیاهان وقتی در شرایط تنش مانند کمبود عناصر، سردشدن هوا یا میزان نمک زیاد قرار می‌گیرند، برگ‌های گیاه به رنگ قرمز در می‌آید، این رنگ قرمز به‌دلیل تجمع آنتوسیانین‌ها است. در واقع در شرایط تنش میزان آنتوسیانین‌ها افزایش یافته و با محافظت از سلول‌های مزوفیل، فعالیت نوری گیاه را کاهش می‌دهد و مانع از جذب انرژی بیش از حد و انعطاف‌پذیری الکترون‌های زنجیره انتقال الکترون در فرآیند فتوسنتز می‌شود که بدین صورت آنتوسیانین‌ها از اکسیداسیون نوری سلول‌ها و بافت‌ها توسط رادیکال‌های آزاد اکسیژن جلوگیری می‌کنند (۱۶). در پژوهش حاضر با افزایش غلظت نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم، میزان آنتوسیانین نیز افزایش یافته است و این شاید به این دلیل باشد که غلظت‌های بالای نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم، سبب ایجاد تنش برای گیاه شده و در شرایط تنش به‌دلیل تنفس نوری، تجمع بیش از حد نور و انعطاف‌پذیری الکترون‌ها در جذب نور، رادیکال‌های آزاد اکسیژن بیشتر شده و درنتیجه میزان آنتوسیانین برای مقابله با این رادیکال‌های آزاد افزایش می‌یابد (۱۰). در پژوهشی که توسط چوی و همکاران (۷) به‌منظور بررسی اثر محلول پاشی نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم بر محتوای بیوشیمیایی میوه توت‌فرنگی انجام شده بود، نتایج نشان داد که با افزایش غلظت نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم میزان آنتوسیانین افزایش یافته و بیشترین میزان در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نانو ذرات به‌دست آمد که با نتایج حاصل از این پژوهش مطابقت داشت. رنجبر و همکاران (۳۱) گزارش کردند که آسکوربیک اسید به شدت تحت تأثیر آبی که میوه از دست می‌دهد، قرار می‌گیرد. به عبارتی با گذشت زمان و قرار گرفتن در معرض تنش شدیدتر هر چه وزن میوه کاهش می‌یابد به همان میزان آسکوربیک اسید نیز کاهش می‌یابد. در پژوهش حاضر میزان آسکوربیک اسید با افزایش شدت تنش به‌صورت تدریجی کاهش پیدا کرد. بر اساس گزارش‌های قبلی به‌نظر می‌رسد که به‌دلیل محلول بودن

آسکوربیک اسید در آب و وابستگی آن به وجود آب در داخل سلول می‌توان گفت که کاهش آب‌میوه در اثر تنش یکی از علل کاهش میزان آسکوربیک اسید می‌تواند باشد.

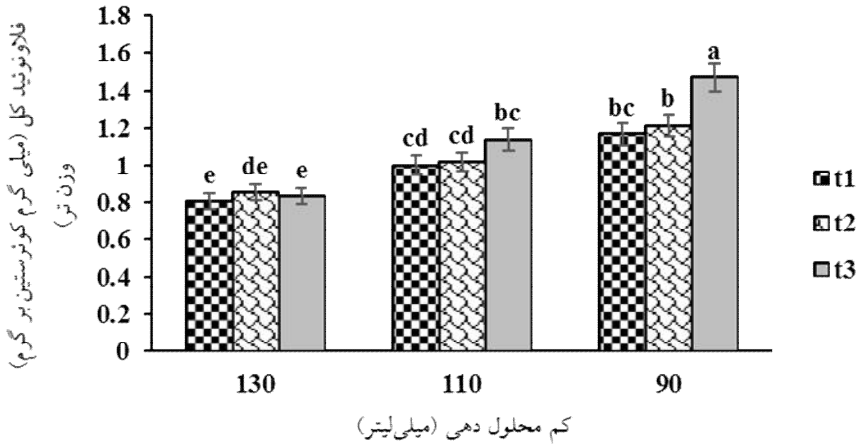
محتوای فنل کل و فلاونوئید کل

تجزیه واریانس داده‌ها نشان می‌دهد که اثرات ساده کم محلول‌دهی و تیمار با نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر محتوای فنل کل در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود اما اثرات متقابل آن‌ها معنی‌دار نشد (جدول ۲). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که با افزایش غلظت نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم محتوای فنل کل روند افزایشی داشت به‌طوری‌که بیشترین و کمترین محتوای فنل کل (به‌ترتیب ۲ و ۱/۱۹ میلی‌گرم گالیک اسید بر گرم وزن تر میوه) به‌ترتیب در تیمار ۱۲ میلی‌گرم در لیتر نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم و شاهد به‌دست آمد (شکل a–۷). در تیمار کم محلول‌دهی نیز با کاهش میزان محلول، محتوای فنل کل افزایش پیدا کرد به‌طوری‌که بیشترین و کمترین محتوای فنل کل (۱/۸۱ و ۱/۰۴ میلی‌گرم گالیک اسید بر گرم وزن تر میوه) به‌ترتیب در تیمار کم محلول‌دهی ۹۰ و ۱۳۰ میلی‌لیتر به‌دست آمد (شکل b–۷). در مورد فلاونوئید کل، نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر متقابل کم محلول‌دهی و نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر میزان فلاونوئید کل در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که با افزایش شدت تیمار کم محلول‌دهی و نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم میزان فلاونوئید کل روند افزایشی داشت. بیشترین میزان فلاونوئید کل (۱/۴۶ میلی‌گرم کوئرسیتین بر گرم وزن تر میوه) در تیمار ۱۲ میلی‌گرم در لیتر نانو دی‌اکسید تیتانیوم و کم محلول‌دهی ۹۰ میلی‌لیتر به‌دست آمد. کمترین میزان فلاونوئید کل (۰/۸۱ میلی‌گرم کوئرسیتین بر گرم وزن تر میوه) نیز در غلظت صفر نانو دی اکسید تیتانیوم و کم محلول‌دهی ۱۳۰ میلی‌لیتر دیده شد (شکل ۸).

یکی از ترکیبات مهم و ضروری در طی فرایند رشد و نمو گیاهان، ترکیبات فنلی هستند که به‌دلیل نقش مؤثر خود در حفاظت از گیاهان در مقابل آسیب‌های اکسیداتیو و تنش‌های محیطی بسیار موردتوجه قرار گرفته‌اند (۱۲). سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی شامل آنتی‌اکسیدان‌های غیرآنزیمی (ازجمله ترکیبات فنلی و فلاونوئیدی، بتاکاروتن، آسکوربیک اسید، آلفاتوکوفرول، گلوتاتیون) و آنزیمی (شامل سوپراکسیددیسموتاز، گایاکول پراکسیداز، آسکوربات پراکسیداز، کاتالاز، پلی‌فنل اکسیداز و گلوتاتیون ردوکتاز) هستند (۸). در مطالعه‌ی، با بررسی اثر محلول پاشی نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم روی محتوای بیوشیمیایی میوه توت فرنگی مشخص شد که با افزایش غلظت نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم میزان ترکیبات فنلی شامل محتوای فنل کل و فلانوئید کل افزایش یافته و بیشترین میزان در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم به‌دست آمد (۷) که با نتایج حاصل از این پژوهش مطابقت داشت. همچنین در مطالعه‌ای که مزارعی و همکاران (۲۴) روی گیاه مریم گلی انجام دادند، مشخص شد که غلظت‌های مختلف نانو دی‌اکسید تیتانیوم منجر به افزایش ترکیبات فنلی شد به‌طوری‌که میزان این ترکیبات نسبت به شاهد ۲۰/۲ درصد افزایش نشان داد. در پژوهشی دیگر که توسط هدایتی و همکاران (۱۵) بر روی دو گونه از گیاه بذرالبنج انجام شد با افزایش غلظت نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم محتوای فنل کل و فلاونوئید کل در هر دو گونه افزایش پیدا کرد. طبق تحقیقاتی که انجام گرفته مشخص شده است که، قرار گرفتن سلول‌ها در معرض نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم منجر به تولید گونه‌های فعال اکسیژن و تنش اکسیداتیو می‌شود. البته مکانسیم مقابله سلول‌های گیاهی با سمیت ناشی از غلظت‌های بالای محرک‌هایی نظیر نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم ناشناخته است ولی گزارش شده است که کاهش فعالیت و یا حذف گونه‌های فعال اکسیژن از طریق فعال کردن سیستم‌های دفاعی ازجمله افزایش بیان ژن‌های دخیل در تولید ترکیبات دفاعی و متابولیت‌های ثانویه مثل محتوای فنل کل و فلاونوئیدها نقش مهمی در کاهش اثرات تنش القاء شده توسط تیتانیوم ایفاء می‌کنند (۱۱ و ۱۲).



شکل ۷. مقایسه میانگین اثرات ساده نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم (a) و کم محلول‌دهی(b) بر محتوی فنل کل توت‌فرنگی رقم سابرینا
حروف غیرمشابه نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد در بین میانگین‌ها در آزمون دانکن است.



شکل ۸. مقایسه میانگین اثر متقابل نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم و کم محلول‌دهی بر فلاونوئید کل توت‌فرنگی رقم سابرینا
(t1: صفر میلی‌گرم بر لیتر دی‌اکسید تیتانیوم ، t2: ۶ میلی‌گرم بر لیتر دی‌اکسید تیتانیوم و t3: ۱۲ میلی‌گرم بر لیتر دی‌اکسید تیتانیوم).
حروف غیرمشابه نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد در بین میانگین‌ها در آزمون دانکن است.

ظرفیت آنتی‌اکسیدانی

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات اصلی کم محلول‌دهی و نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم و همچنین اثرات متقابل آن‌ها بر فعالیت آنتی‌اکسیدانی در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که با افزایش شدت تیمار کم محلول‌دهی و نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم فعالیت آنتی‌اکسیدانی روند افزایشی داشت. تأثیر تیمار نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم در شریط کم محلول‌دهی در مقایسه با سایر تیمارها بیشتر بود. به‌طوری‌که بیشترین میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی (۴۸/۱ درصد) در تیمار ۱۲ میلی‌گرم در لیتر نانو دی‌اکسید تیتانیوم و کم محلول‌دهی ۹۰ میلی‌لیتر به‌دست آمد. کمترین میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی (۴۱/۱ درصد) نیز در غلظت صفر نانو دی‌اکسید تیتانیوم و کم محلول‌دهی ۱۳۰ میلی‌لیتر دیده شد (شکل ۹).

شرایط تنشی اعمال شده به گیاهان در اثر کاهش میزان محلول غذایی منجر به افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی با افزایش شدت کم محلول‌دهی و غلظت نانو دی اکسید تیتانیوم شد. فعالیت آنتی‌اکسیدانی وابسته به ساختارهای شیمیایی ترکیبات

است که به آن‌ها اجازه می‌دهد به‌عنوان عوامل احیاء کننده عمل کنند. DPPH یک رادیکال آزاد ناپایدار است که در حضور ترکیبات آنتی‌اکسیدان، می‌تواند یک الکترون و یا یک اتم هیدروژن بپذیرد تا به یک مولکول بسیار پایدار DPPH تبدیل شود (۲۸). میزان ظرفیت آنتی‌اکسیدانی همبستگی بالایی با محتوای فنل کل و فلاونوئید کل داشته و شاید به همین دلیل است که در غلظت‌های بالای نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم ظرفیت آنتی‌اکسیدانی افزایش یافته است، براساس تحقیقات انجام شده نانو دی‌اکسید تیتانیوم تأثیر مثبتی در کاهش اثرات مخرب تنش خشکی دارد. نانو دی‌اکسید تیتانیوم با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و کاهش رادیکال‌های آزاد اکسیژن و محتوای مالون دی‌آلدهید باعث کاهش اثرات تنش خشکی می‌شود (۴۲). تحقیقات گذشته نشان داده است که نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم از طریق تقویت سیستم آنتی‌اکسیدانی قادر است که از اثرات مخرب تنش اکسیداتیو و مرگ سلول گیاهی جلوگیری کند (۱۹).

فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی

آنزیم کاتالاز

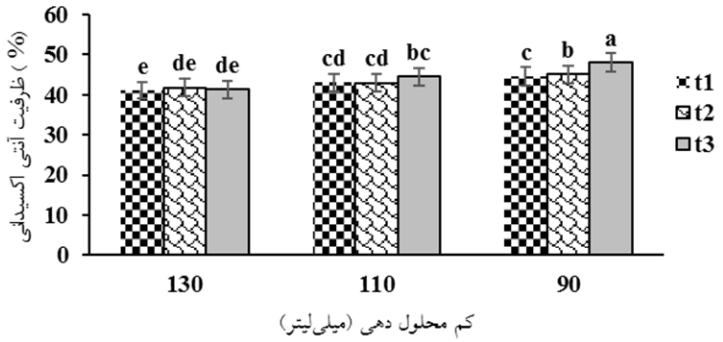
بر اساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثر متقابل کم محلول‌دهی و نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر میزان فعالیت آنزیم کاتالاز در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). همچنین مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که با افزایش شدت تیمار کم محلول‌دهی و نانو دی‌اکسید تیتانیوم میزان فعالیت آنزیم کاتالاز افزایش پیدا کرد. محلول پاشی با نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم در شرایط کم محلول‌دهی ۱۳۰ و ۱۱۰ میلی‌لیتر منجر به افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز شد اما این اختلاف از نظر آماری معنی‌دار نبود و این دو تیمار از نظر آماری در شرایط مشابهی قرار داشتند. بیشترین میزان فعالیت آنزیم کاتالاز (۱/۹۶ واحد بر گرم وزن تر میوه) در تیمار ۱۲ میلی‌گرم بر لیتر نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم و کم محلول‌دهی ۹۰ میلی‌لیتر به‌دست آمد. کمترین میزان فعالیت آنزیم کاتالاز (۰/۲۷ واحد بر گرم وزن تر میوه) نیز در غلظت صفر نانو دی‌اکسید تیتانیوم و کم محلول‌دهی ۱۳۰ میلی‌لیتر دیده شد (شکل a–۱۰).

آنزیم گایاکول پراکسیداز

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که به مانند آنزیم کاتالاز، اثر متقابل کم محلول‌دهی و نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر میزان فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). بر اساس مقایسه میانگین داده‌ها، با افزایش شدت تیمار کم محلول‌دهی و نانو دی‌اکسید تیتانیوم میزان فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز افزایش پیدا کرد. بیشترین میزان فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز (۲/۴۳ واحد بر گرم وزن تر) در تیمار ۱۲ میلی‌گرم بر لیتر نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم و کم محلول‌دهی ۹۰ میلی‌لیتر به‌دست آمد و کمترین میزان فعالیت این آنزیم (۰/۳۲ واحد بر گرم وزن تر میوه) نیز در تیمار شاهد (صفر) نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم و کم محلول‌دهی ۱۳۰ میلی‌لیتر مشاهده شد (شکل b–۱۰).

آنزیم آسکوربات پراکسیداز

اثر متقابل کم محلول‌دهی و نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر میزان فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). مقایسه میانگین داده‌ها نیز نشان داد که میزان فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز با افزایش شدت تیمار کم محلول‌دهی و نانو دی‌اکسید تیتانیوم افزایش پیدا کرد. بیشترین میزان فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز (۲/۲۹ واحد بر گرم وزن تر میوه) در تیمار ۱۲ میلی‌گرم بر لیتر نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم و کم محلول‌دهی ۹۰ میلی‌لیتر به‌دست آمد. کمترین میزان فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز (۰/۶۳ واحد بر گرم وزن تر میوه) نیز در غلظت صفر نانو دی‌اکسید تیتانیوم و کم محلول‌دهی ۱۳۰ میلی‌لیتر دیده شد. اختلاف بین غلظت‌های مختلف نانو دی‌اکسید تیتانیوم در کم محلول دهی ۱۳۰ و ۱۱۰ میلی‌لیتر بر میزان فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز مشابه یکدیگر بود (شکل c–۱۰).



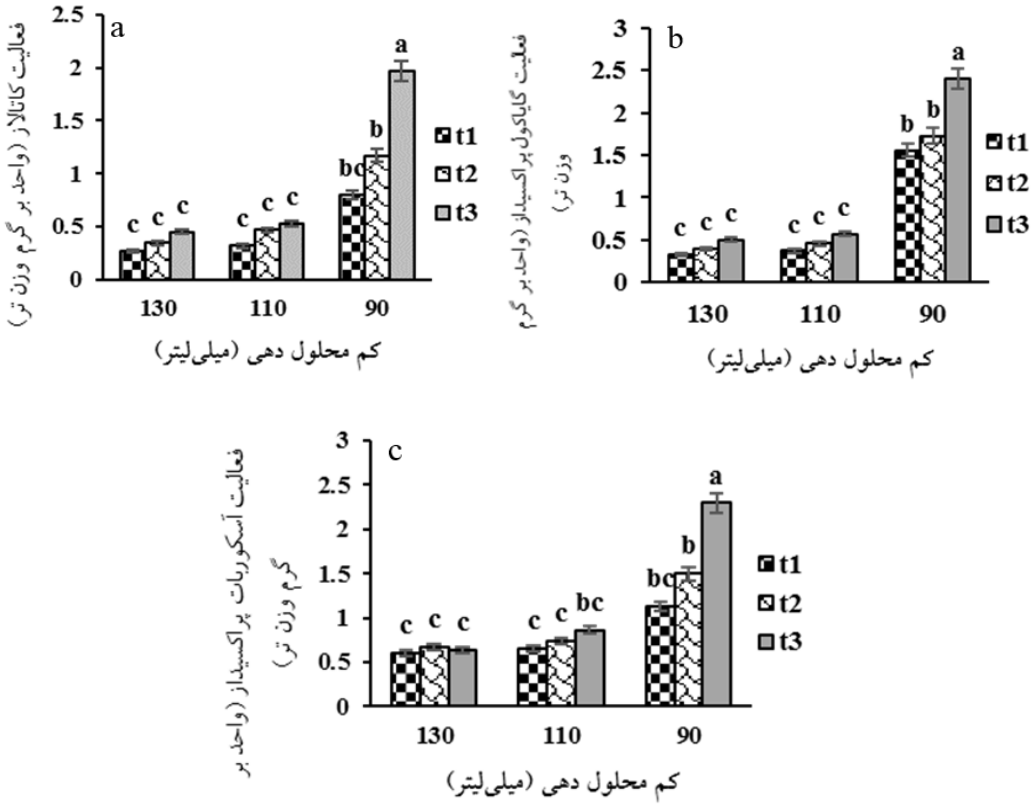
شکل ۹. مقایسه میانگین اثر متقابل نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم و کم محلول‌دهی بر ظرفیت آنتی اکسیدانی توت‌فرنگی رقم سابرینا (t1: صفر میلی‌گرم بر لیتر دی‌اکسید تیتانیوم، t2: ۶ میلی‌گرم بر لیتر دی‌اکسید تیتانیوم و t3: ۱۲ میلی‌گرم بر لیتر دی‌اکسید تیتانیوم). حروف غیرمشابه نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد در بین میانگین‌ها در آزمون دانکن است.

جدول ۳. تجزیه واریانس آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و برخی عناصر اندازه‌گیری شده تحت تأثیر تیمار کم محلول‌دهی و نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم در توت‌فرنگی رقم سابرینا

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات				
		کاتالاز	گایاکول پراکسیداز	آسکوربات پراکسیداز	عنصر روی	عنصر آهن
کم محلول دهی (a)	۲	۲/۵۳**	۶/۳۹**	۲/۷۳**	۴۰/۴*	۸۲۷۱۶**
نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم (b)	۲	۰/۶۱**	۰/۳۹**	۰/۵۱**	۷/۹۳ns	۲۷۴۳**
اثر متقابل (a*b)	۴	۰/۲۵*	۰/۱۲**	۰/۲۹*	۲/۴۷ns	۷۵۰**
اشتباه آزمایشی	۱۸	۰/۰۷	۰/۰۲	۰/۰۷	۵/۰۵	۵/۱۴
ضریب تغییرات (CV%)		۳۷/۶	۱۵/۲	۲۶/۲	۹/۲۱	۱/۱۴

ns، * و **: به‌ترتیب غیر معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال پنج و یک درصد هستند.

یکی از اولین پاسخ گیاهان تحت شرایط تنش، مخصوصاً تنش خشکی، بسته شدن روزنه‌ها برای جلوگیری از هدر رفت آب از طریق تعرق است. بعد از بسته شدن روزنه‌ها میزان دی‌اکسید کربن (CO_2) در برگ کاهش یافته و درنتیجه سرعت فتوسنتز کاهش می‌یابد. کمتر بودن میزان CO_2 در فضای بین سلولی واکنش‌های چرخه کلوین را کاهش می‌دهد که موجب مصرف کمتر NADPH و ATP می‌شود. این پاسخ منجر به عدم تولید مجدد گیرنده‌های الکترون (NADP +, NAD +, FAD) شده و سرانجام انتقال الکترون از زنجیره انتقال الکترون به اکسیژن را تسهیل می‌کند و موجب تولید بیشتر گونه‌های فعال اکسیژن می‌شود (۲۶). تولید بیش از حد گونه‌های فعال اکسیژن سمی است، زیرا باعث ایجاد آسیب در ساختارهای پروتئینی و مهار آنزیم‌ها و همچنین لیپیدهای غشای سلول و DNA شده و در نهایت موجب تنش اکسیداتیو و مرگ سلول می‌شود (۲۵ و ۲۷). گیاهان از طریق مکانیسم‌های آنتی‌اکسیدانی آنزیمی و غیر آنزیمی گونه‌های فعال اکسیژن را جاروب می‌کنند (۳۰). دستگاه آنتی‌اکسیدان آنزیمی، شامل سوپراکسید دیسموتاز، پراکسیداز، کاتالاز، گلوتاتیون ردوکتاز و آسکوربات پراکسیداز، وظیفه حفاظت از تأثیرات سمی گونه‌های فعال اکسیژن را بر عهده دارند. کاتالاز آنزیم مهمی است که در پراکسی‌زوم، سیتوزول و میتوکندری سبب تبدیل پراکسید هیدروژن به آب و اکسیژن می‌شود. آسکوربات پراکسیداز نیز از آسکوربات به‌عنوان دهنده الکترون در ابتدای سیکل گلوتاتیون آسکوربات استفاده می‌کند (۳۹). مطالعات نشان داده است که یک ارتباط قوی بین تحمل به خسارات اکسیداتیو با افزایش آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در گیاهان وجود دارد (۳۳). مکانیسم‌های مختلفی جهت ایجاد

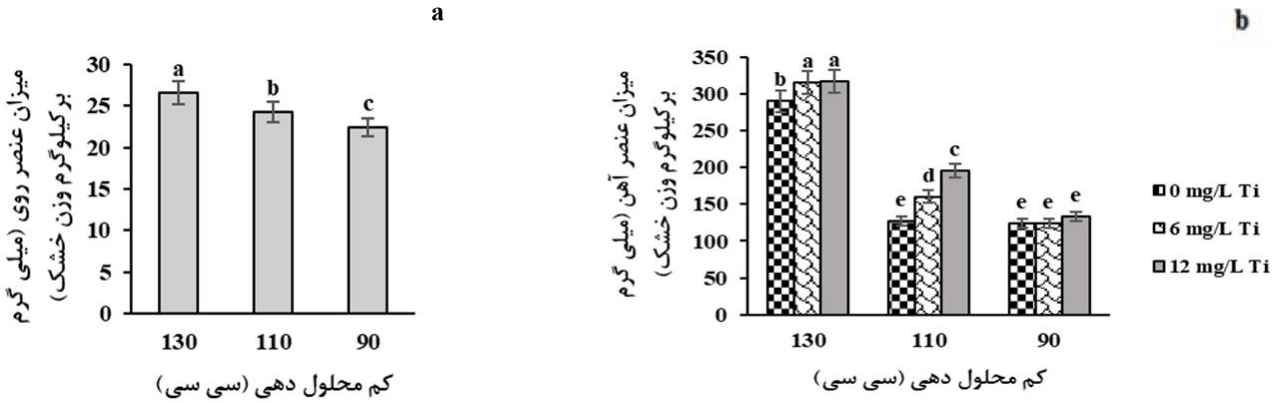


شکل ۱۰. مقایسه میانگین اثر متقابل نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم و کم محلول‌دهی بر میزان فعالیت آنزیم‌های کاتالاز(a)، گایاکول پراکسیداز (b) و آسکوربات پراکسیداز (c) توت‌فرنگی رقم سابرینا (t1: صفر میلی‌گرم بر لیتر دی‌اکسید تیتانیوم، t2: ۶ میلی‌گرم بر لیتر دی‌اکسید تیتانیوم و t3: ۱۲ میلی‌گرم بر لیتر دی اکسید تیتانیوم).

حروف غیرمشابه نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد در بین میانگین‌ها در آزمون دانکن است.

پاسخ به تنش اکسیداتیو ناشی از نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در گیاهان گزارش شده است: اولین مکانیسم مربوط به افزایش تعدیل (Modulating) مسیر پیام‌رسانی گونه‌های فعال اکسیژن به‌واسطه نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم (به‌وسیله توانایی پرواکسیدان/آنتی‌اکسیدان این ترکیب) است (۲۳) و دومین مکانیسم هم با تحریک متابولیسم نیتروژن در گیاهان از طریق نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم در ارتباط است (۴۰).

زرافشار و همکاران (۴۱) بیان کردند که محلول‌پاشی نانو ذرات تیتانیوم به ویژه با غلظت‌های کم (۲۰ و ۴۰ میلی‌گرم در لیتر) بر روی اندام هوایی نهال‌های گلابی وحشی از طریق تعدیل تبادلات گازی و افزایش آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، باعث تعدیل اثرات مخرب تنش خشکی می‌شود. پایس (۲۹) نیز افزایش فعالیت آنزیم‌هایی همچون پروکسیداز، کاتالاز و نیترات ردوکتاز در بافت‌های گیاهان را در اثر کاربرد دی اکسید تیتانیوم ثابت کردند. عباسی و همکاران (۱) در پژوهشی نشان دادند که با کاربرد نانو دی اکسید تیتانیوم ۲ درصد در شرایط تنش کمبود آب ۷۵ و ۵۰ درصد میزان فعالیت پروکسیداز به‌ترتیب ۵۰/۵ و ۵۸ درصد افزایش یافت. طبق اظهار نظر آن‌ها میزان پراکسید هیدروژن در این تیمارها به شدت کاهش یافت که عامل اصلی حفظ تعادل سلولی است، با توجه به این که برخی از آنزیم‌های چرخه کالوین به تجمع این رادیکال‌ها حساس می‌باشند، در تیمارهایی که میزان فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز و کاتالاز در بالاترین مقدار خود بودند، در این تیمارها میزان پراکسید هیدروژن در کمترین مقدار خود قرار داشت که این امر نشان از افزایش مقاومت گیاهان در اثر کاربرد نانو ذرات دی-اکسید تیتانیوم داشت.



شکل ۱۱. مقایسه میانگین اثر ساده کم محلول‌دهی بر میزان عنصر روی (a) و اثر متقابل نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم و کم محلول دهی بر میزان عنصر آهن (b) توت فرنگی رقم سابرینا. حروف غیرمشابه نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد در بین میانگین‌ها در آزمون دانکن است.

عناصر غذایی روی و آهن

بر اساس نتایج حاصله، اثر متقابل کم محلول‌دهی و تیمار با نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم و همچنین اثر ساده نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم در میزان عنصر روی گیاهان تیمار شده غیر معنی‌دار بود ولی اثر ساده کم محلول‌دهی بر میزان این عنصر معنی‌دار شد (جدول ۳). با توجه به مقایسه میانگین داده‌ها، بیشترین میزان عنصر روی (۲۶/۵) در تیمار کم محلول دهی ۱۳۰ میلی‌لیتر و کمترین میزان عنصر روی (۲۲/۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک برگ) در تیمار ۹۰ میلی‌لیتر به‌دست آمد. به عبارت دیگر با کاهش میزان محلول‌دهی از مقدار عنصر روی نیز کاسته شده است (شکل a–۱۱). همچنین بررسی نتایج نشان داد که اثر متقابل کم محلول‌دهی و تیمار با نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر میزان عنصر آهن در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که با افزایش غلظت نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم، میزان عنصر آهن نیز افزایش پیدا کرد و برعکس با افزایش میزان کم محلول‌دهی از میزان عنصر آهن کاسته شد. بدین ترتیب بیشترین میزان عنصر آهن در تیمار شاهد کم محلول‌دهی و غلظت‌های ۶ و ۱۲ میلی‌گرم بر لیتر نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم (۳۱۷ و ۳۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک برگ) و کمترین میزان این عنصر (۱۲۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک برگ) نیز در تیمار کم محلول‌دهی ۹۰ میلی‌لیتر و غلظت شاهد نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم به‌دست آمد (شکل b–۱۱).

تنش یکی از مهم‌ترین و رایج ترین فاکتورهایی است که عملکرد کشاورزی را با محدودیت روبه‌رو ساخته و راندمان تولید را در مناطقی که با این پدیده مواجه هستند به شدت کاهش می‌دهد. محدودیت آب علاوه بر اثر منفی بر روی عملکرد، باعث بروز یا تشدید سایر تنش‌ها، به خصوص تنش کمبود عناصر غذایی برای گیاه می‌شود. یکی از زیان‌بارترین اثرات تنش خشکی (کم محلول‌دهی) اختلال در روند جذب و تجمع عناصر غذایی است که علاوه بر تلفات کود، باعث کاهش عملکرد نیز می‌شود (۲). در این پژوهش نیز با کاهش میزان محلول‌دهی که به نوعی رطوبت و عناصر در دسترس گیاه را محدود می‌ساخت، میزان عناصر روی و آهن مورد ارزیابی، نیز کاهش پیدا کرد. ولی با افزایش غلظت نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم مورد استفاده در این آزمایش میزان جذب عناصر روی و آهن در گیاه افزایش پیدا کرده و بیشترین مقدار آن‌ها در بالاترین غلظت نانو ذرات مشاهده شد. نانو ذرات در تحریک رشد رویشی و تسهیل در جذب عناصر میکرو به ریشه گیاه نقش دارند. بدین ترتیب منجر به افزایش رشد و عملکرد گیاهان می‌شوند. کاربرد نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم توانایی گیاه را در مصرف مواد مغذی افزایش می‌دهد. به‌طوری‌که

گزارش شده است با کاربرد این نانو ذره بر روی گوجه‌فرنگی در شرایط گلخانه‌ای میزان کلسیم، نیتروژن، فسفر، منیزیم و آهن موجود در گیاه افزایش یافته است (۱۸). همچنین مشابه نتایج حاضر، رسولی و همکاران (۳۲) گزارش کردند که با بکار بردن بالاترین غلظت (۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم در گیاه بادمجان، میزان عناصر روی و آهن در برگ این گیاه به‌ترتیب ۸۷/۵ و ۸۸/۷۸ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت.

نتیجه‌گیری کلی

استفاده از انواع کودهای جدید از جمله نانو کودها می‌تواند ضمن کاهش میزان مصرف کود به‌دلیل جذب بالاتر آن به‌علت سطح ویژه زیاد، در جهت حصول عملکرد بالا مفید واقع شوند. در پژوهش حاضر کاربرد نانو کود دی‌اکسید تیتانیوم در شرایط کم محلول‌دهی بر رشد و عملکرد توت فرنگی رقم سابرینا تأثیر مثبت و مفیدی داشتند. استفاده از نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم، به‌خصوص در غلظت ۱۲ میلی‌گرم بر لیتر، باعث بهبود عملکرد صفاتی نظیر طول، عرض و وزن میوه، عملکرد، میزان آنتوسیانین، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و میزان عنصر آهن میوه توت‌فرنگی شد. بنابراین با توجه به نتایج این پژوهش می‌توان گفت که استفاده از نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم در شرایط کم محلول‌دهی، افزایش خصوصیات کمی و کیفی میوه توت فرنگی و همچنین صرفه‌جویی در مصرف محلول غذایی را در پی خواهد داشت.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از تمامی حمایت‌ها و مساعدت‌های دانشگاه ارومیه جهت فراهم نمودن امکانات مورد نیاز برای اجرای این پژوهش، تشکر و قدردانی به‌عمل می‌آید.

منابع مورد استفاده

1. Abbasi, A., R. Lotfi and M. Janmohammadi. 2018. Response of antioxidant defense mechanism and wheat yield changes to drought stress with application of different concentrations of nano-silicone and nano-titanium. *Iranian Journal* of *Dryland Agriculture* 7: 79-101. (In Farsi).
2. Alizadeh, O., E. Majedi and G. H. Nour Mohammadi. 2008. Effect Of water stress and soil nitrogen on nutrients absorption in corn plant Ksc 704 . *Journal of Research in Agricultural Sciences* 4: 51-59. (In Farsi).
3. Aebi, H. 1984. Catalase *in vitro*. *Methods in Enzymology* 105: 121-126.
4. Alcaraz, C., M. Botia, F. Carlos and R. Fernando. 2004. Effect of foliar sprays containing calcium, magnesium and titanium on peach (*Prunus persica* L.) fruit quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 84: 949-954.
5. Chang, C. C., M. H. Yang, H. M. Wen and J. C. Chern. 2002. Estimation of total flavonoid content in propolis by two complementary colorimetric methods. *Journal of Food and Drug Analysis* 10: 178-182.
6. Chiou, A., V. T. Karathanos, A. Mylona, F. N. Salta, F. Preventi and N. K. Andrikopoulos. 2007. Currants (*Vitis vinifera* L.) content of simple phenolics and antioxidant activity. *Food Chemistry* 102: 516-522.
7. Choi, H. G., B. Y. Moon, K. Bekhzod, K. S. Park, J. K. Kwon, J. K. Lee, J. H. Cho, M. W. Cho and N. J. Kang. 2015. Effects of foliar fertilization containing titanium dioxide on growth, yield and quality of strawberries during cultivation. *Horticulture, Environment, and Biotechnology* 56: 575-581.
8. Daneshmand, F. 2014. Response of antioxidant system of tomato to water deficit stress and its interaction with ascorbic acid. *Iranian Journal of Plant Biology* 6: 57-72. (In Farsi).
9. Ebrahimi, R., M. Souri, F. Ebrahimi and M. Ahmadizadeh. 2012. Growth and yield of strawberries under different potassium concentrations of hydroponic system in three substrates. *World Applied Sciences Journal* 16: 1380-1386.
10. Eskandarinasab, M., M. Rafieiolhossaini, P. Roshandel and M. R. Tadayon. 2019. Investigation of seed germination indices and anthocyanin content of niger (*Guizotia abyssinica*) seedling under the effect of three nanoparticles. *Iranian Jounal of Seed Research* 5: 73-89. (In Farsi).
11. Falck, G. C. M., H. K. Lindberg, S. Suhonen, M. Vippola, E. Vanhala, J. Catalan, K. Savolainen and H. Norppa. 2009. Genotoxic effects of nanosized and fine TiO_2. *Human and Experimental Toxicology* 28: 339-352.
12. Ghorbanpour, M. 2015. Major essential oil constituents, total phenolics and flavonoids content and antioxidant activity of *Salvia officinalis* plant in response to nano-titanium dioxide. *Indian Journal of Plant Physiology* 20: 249-256.

13. Hajimahdipour, H., M. Khanavi, M. SHekarchi, Z. Abedi and M. Pirali Hamedani. 2009. Investigation of the best method for extraction of phenolic compounds from *Echinacea purpurea* L (Moench). *Journal of Medicinal Plants* 8: 145-152. (In Farsi).
14. Hara, M., O. Karin, K. Hoshino and T. Kuboi. 2003. Enhancement of anthocyanin biosynthesis by sugar in radish (*Raphanus sativus*) hypocotyls. *Plant Science* 164: 259-265.
15. Hedayati, A., B. Hosseini, J. Palazon and R. Maleki. 2020. Improved tropane alkaloid production and changes in gene expression in hairy root cultures of two *Hyoscyamus* species elicited by silicon dioxide nanoparticles. *Plant Physiology and Biochemistry* 155: 416-428.
16. Heldt, H. W. and B. Piechull. 2011. Phenylpropanoids comprise a multitude of plant secondary metabolites and cell wall components. *Plant Biochemistry* 4: 446-447.
17. Khodamoradi, P. 2017. Effect of different levels of salinity and humic acid on some morphological and physiological characteristics of strawberry cultivar Sabrina under hydroponic cultivation. M.Sc. Thesis. University of Urmia. Urmia, Iran. (In Farsi).
18. Kleiber, T. and B. Markiewicz. 2013. Application of "Tytanit" in greenhouse tomato growing. *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Culturs* 12: 117-126.
19. Lei, Z., S. Mingyu, W. Xiao, L. Chao, Q. Chunxiang, C. Liang, H. Hao, L. Xiaoqing and H. Fashui. 2008. Antioxidant stress is promoted by nano- anatase in spinach chloroplasts under UV-B radiation. *Biological Trace Element Research* 121: 69-79.
20. Levitt, J. 1980. Responses of Plants to Environmental Stress. Academic Press. New York.
21. Mac-Adam, J. W., C. J. Nelson and R. E. Sharp. 1992. Peroxidase activity in the leaf elongation zone of tall fescue: I. Spatial distribution of ionically bound peroxidase activity in genotypes differing in length of the elongation zone. *Plant Physiology* 99: 872-878.
22. Majedi, M. 1994. Methods chemical test of food. Tehran University Publications of Jahad, Tehran. (In Farsi).
23. Mattiello, A., A. Filippi, F. Pošćić, R. Musetti, M. C. Salvatici, C. Giordano, M. Vischi, A. Bertolini and L. Marchiol. 2015. Evidence of phytotoxicity and genotoxicity in *Hordeum vulgare* L. exposed to CeO_2 and TiO_2 nanoparticles. *Frontiers in Plant Science* 6: 1043.
24. Mazarie, A., S. M. Mousavi-nik, A. Ghanbari and L. Fahmideh. 2019. Effect of different spraying concentrations of jasmonic acid and titanium dioxide nanoparticles on some physiological traits and antioxidant system activity of Sage (*Salvia officinalis* L). *Iranian Journal of Plant Biology* 11. 1-22. (In Farsi).
25. Mittler, R. and E. Blumwald. 2015. The roles of ROS and ABA in systemic acquired acclimation. *Plant Cell* 27: 64-70.
26. Nakano, Y. and K. Asada. 1987. Purification of ascorbate peroxidase in spinach chloroplasts; its inactivation in ascorbate-depleted medium and reactivation by monodehydroascorbate radical. *Plant and Cell Physiology* 28: 131-140.
27. Noctor, G., A. Mhamdi and C. H. Foyer. 2014. The roles of reactive oxygen metabolism in drought: not so cut and dried. *Plant Physiology* 164: 1636-1648.
28. Nour, V., I. Trandafir and S. Cosmulescu. 2014. Influence of preparing method on antioxidant activity and polyphenols content of green Walnuts comfiture. *South-western Journal of Horticulture, Biology Environment* 5: 83-94.
29. Pais, I. 1983. The biological importance of titanium. *Journal of Plant Nutrition* 6: 123-131.
30. Sabra, A., F. Daayf and S. Renault. 2012. Differential physiological and biochemical responses of three *Echinacea* species to salinity stress. *Scientia Horticulturae* 135: 23-31.
31. Ranjbar, H., M. Hasanpour Asil, M. A. Asgari Sarcheshmeh, H. A. Samizadeh Lahiji and A. Bani Asadi. 2007. The Effects of calcium chloride, hot water treatment and polyethylene bag packaging on the storage life and quality of pomegranate (Cv: Malas-Saveh). *Iranian Journal of Food Science and Technology* 4: 1-10. (In Farsi).
32. Rasouli, F., F. Abedini and S. M. Zahedi. 2016. The effect of Titanium nano dioxide on physiological particular and chlorophyll fluorescence parameters in Eggplant (*Solanum melongena* L.) under water deficit stress. *Journal of Vegetables Sciences* 2: 37-51. (In Farsi).
33. Sairam, R. K. and G. C. Srivastava. 2002. Changes in antioxidant activity in sub-cellular fractions of tolerant and susceptible wheat genotypes in response to long term salt stress. *Plant Science* 162: 897-904.
34. Sharma, S. P., D. I. Leskovar, K. M. Crosby, A. Volder and A. M. H. Ibrahim. 2014. Root growth, yield, and fruit quality responses of reticulatus and inodorus melons (*Cucumis melo* L.) to deficit subsurface drip irrigation. *Agricultural Water Management* 136: 75-85.
35. Slinkard, K. and V. L. Singleton. 1977. Total phenol analysis: automation and comparison with manual methods. *American Journal of Enology and Viticulture* 28: 49-55.
36. Sudhakar, C., A. Lakshmi and S. Giridarakumar. 2001. Changes in the antioxidant enzyme efficacy in two high yielding genotypes of mulberry (*Morus alba* L.) under NaCl salinity. *Plant Science* 161: 613-619.
37. Weber, N. C., V. Schmitzer, J. Jakopic and F. Stampar. 2018. First fruit in season: seaweed extract and silicon advance organic strawberry *(Fragaria×ananassa* Duch.) fruit formation and yield. *Scientia Horticulturae* 242: 103-109.

38. Wei, Y., X. Shao, Y. Wei, F. Xu and H. Wang. 2018. Effect of preharvest application of tea tree oil on strawberry fruit quality parameters and possible disease resistance mechanisms. *Scientia Horticulturae* 241: 18-28.
39. Wu, Q. S., Y. N. Zou and E. F. Abd-Allah. 2014. Mycorrhizal association and ROS in plants. pp. 453-475, In: P. Ahmad, (ed.), Oxidative Damage to Plants (Antioxidant Networks and Signaling). Academic press, India.
40. Yuan, S. J., J. J. Chen, Z. Q. Lin, W. W. Li, G. P. Sheng and H. Q. Yu. 2013. Nitrate formation from atmospheric nitrogen and oxygen photocatalysed by nano-sized titanium dioxide. *Nature Communications* 4: 1-7.
41. Zarafshar, M., M. Akbarinia, H. Askary, S. M. Hosseini and M. Rahaie. 2015. Effects of TiO2 NPs on alleviation of drought negative effects in wild pear seedlings. *Journal of Plant Ecosystem Conservation* 3: 81-94. (In Farsi).
42. Mingyu, S., H. Fashui, L. Chao, W. Xiao, L. Xiaoqing, C. Liang, Q. Fengqing, Y. Fan and L. Zhongrui. 2007. Effect of nano-anatase TiO2 on absorption, distribution of light, and photoreduction activities of chloroplast membrane of spinach. *Biological Trace Element Research* 118: 120-130.
43. Yang, F., F. Hong, W. You, C. Liu, F. Gao, C. Wu and P. Yang. 2006. Influence of nano-anatase TiO 2 on the nitrogen metabolism of growing spinach. *Biological trace element research* 110: 179-190.

Journal of Crop Production and Processing
Vol. 12, No. 4, Winter 2023, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Response of Strawberry cv. Sabrina under Deficit Fertigation Conditions to Foliar Application of Titanium Dioxide Nanoparticles

P. Sadeghi[1] and H. Hassanpour[1*]

(Received: October 30-2022; Accepted: December 17-2022)

Abstract

Strawberry (*Fragaria* × *ananassa* Dutch) is a widely grown fruit crop in the world due to its high aroma, taste, and nutritional value. In this study, the effect of foliar application of titanium dioxide nanoparticles on phytochemical modifications of strawberry cv. Sabrina under deficit fertigation conditions was investigated. The interaction effect of titanium dioxide nanoparticles (0, 6 and 12 mg L^{-1}) and deficit fertigation (90, 110 and 130 mL) on some morphological, antioxidant and phytochemical factors of strawberry cv. Sabrina, such as fruit width, length, weight and yield, total phenol and flavonoid content, total antioxidant capacity, antioxidant enzyme activity, acid ascorbic content, total anthocyanin, iron and zinc content were investigated. Results showed that the interaction of titanium dioxide nanoparticles and the amount of nutrient solution on vitamin C content, antioxidant enzymes activity and iron content was significant. The highest fruit width (4.73. cm), fruit length (3.71 cm), fruit fresh weight (52.2 g), fruit yield (527 g) and vitamin C content (51.1 mg 100 mL^{-1}) were observed in the presence of 130 mL of deficient fertigation and 12 mg L^{-1} titanium dioxide nanoparticles treatments. In contrast, the highest catalase (1.96 u/g FW), guaiacol peroxidase (2.42 u/g FW) and ascorbate peroxidase (2.29 u/g FW fruit) were observed upon exposure to 90 mL of deficient fertigation and 12 mg L^{-1} titanium dioxide nanoparticles treatments. In conclusion, deficit fertigation conditions along with the use of titanium dioxide nanoparticles improves morphological and phytochemical properties of strawberries.

Keywords: Antioxidant enzyme, Catalase, Mineral elements, Total anthocyanin content, Total phenol content

1, 2. MSc. Student and Associate Professor, Respectively, Department of Horticulture, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran.
*: Corresponding Author, Email: ha.hassanpour@urmia.ac.ir