

## The Response of Monterey Strawberry Cultivar to Application of Nano Zinc Oxide and Silica in Combination with L-arginine in Terms of Fruit Growth, Quality and Physicochemical Characteristics

Hakeem Shamran<sup>1</sup>, Attallah, Alireza Farokhzad<sup>2\*</sup>, Javad Rezapour Fard<sup>3</sup>

(Received: September 2025      Accepted: October 2025)

### Abstract

Improving strawberry fruit quality plays a crucial role in increasing its marketability and economic value. In this regard, the effects of pre-harvest application of nano zinc oxide (100 mg/L) and nano silica (150 mg/L), alone and in combination with different concentrations of L-arginine (0, 200, and 400 mg/L), along with a control (distilled water), on selected vegetative, qualitative, physicochemical, and antioxidant properties of Monterey strawberry fruit were evaluated using a completely randomized design with nine treatments and three replications. According to the results, the use of nano zinc oxide and nano silica along with L-arginine significantly improved the growth, color, and biochemical indices of strawberry fruit compared to the control. The greatest increase in fruit fresh weight (31.63% compared to the control) was observed with the combination of 100 mg/L nano zinc oxide and 400 mg/L L-arginine. The treatments significantly increased total soluble solids (TSS), decreased titratable acidity (TA), and improved the flavor index of Monterey strawberry fruit. The highest vitamin C content (71.2 mg/100 g FW) was obtained with the 400 mg/L L-arginine treatment. Fruits treated with nano zinc, nano silica, and L-arginine had significantly higher firmness than the control fruits. The highest total phenol content (300.63 mg GA/100 g FW) was recorded in the 150 mg/L nano silica treatment. In the treatment with 100 mg/L nano zinc oxide plus 400 mg/L L-arginine, total flavonoid content increased by 76.6% compared to the control. The highest anthocyanin content (0.465 mg/g FW) was observed with the 200 mg/L L-arginine treatment. Overall, the results of this study showed that the application of nanoparticles and L-arginine can increase the quality and quantity of Monterey strawberry fruit by enhancing growth indices and secondary metabolism.

**Keywords:** Fruit size, Total phenols, Micronutrients, Nanotechnology

Shamran Attallah H., Farokhzad A.R., Rezapour Fard J. 2026. The Response of Monterey Strawberry Cultivar to Application of Nano Zinc Oxide and Silica in Combination with L-arginine in Terms of Fruit Growth, Quality and Physicochemical Characteristics *Applied Soil Research*. 14(2): 119-135

1- Ph. D. Student, Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, Urmia University.

2- Associate Professor, Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, Urmia University.

3- Assistant Professor, Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, Urmia University.

\* Corresponding Author Email: [a.farokhzad@urmi.ac.ir](mailto:a.farokhzad@urmi.ac.ir)

## واکنش توت فرنگی رقم مونتری به کاربرد نانواکسید روی و سیلیس در ترکیب با ال-آرژنین از نظر ویژگی‌های رشدی، کیفی و فیزیکوشیمیایی میوه

حکیم شمران عطاالله<sup>۱</sup>، علیرضا فرخزاد<sup>۲\*</sup> و جواد رضاپور فرد<sup>۳</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۳)

(تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۳)

### چکیده

بهبود کیفیت میوه توت‌فرنگی نقش بسیار مهمی در افزایش بازارپسندی و ارزش اقتصادی آن دارد. در این راستا، تأثیر کاربرد قبل از برداشت نانواکسید روی (۱۰۰ میلی گرم در لیتر) و نانو سیلیس (۱۵۰ میلی گرم در لیتر) به تنهایی و در ترکیب با غلظت های مختلف ال-آرژنین (صفر، ۲۰۰ و ۴۰۰ میلی گرم در لیتر) همراه با شاهد (آب مقطر) بر برخی ویژگی‌های رشدی، کیفی، فیزیکوشیمیایی و آنتی‌اکسیدانی میوه توت‌فرنگی رقم مونتری در قالب طرح آماری کاملاً تصادفی با ۹ تیمار و ۳ تکرار مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج، استفاده از نانواکسید روی و نانوسیلیس به همراه ال-آرژنین به طور معنی داری باعث بهبود شاخص رشدی، رنگی و بیوشیمیایی میوه توت‌فرنگی نسبت به شاهد گردید. بیشترین افزایش وزن تر میوه در ترکیب ۱۰۰ میلی گرم در لیتر نانواکسید روی همراه با ۴۰۰ میلی گرم در لیتر ال-آرژنین (۳۱/۶۳ درصد افزایش نسبت به شاهد) مشاهده شد. تیمارهای مورد استفاده باعث افزایش معنی دار مواد جامد محلول (TSS)، کاهش اسیدهای آلی (TA) و بهبود شاخص طعم میوه توت‌فرنگی رقم مونتری شدند. بیشترین میزان ویتامین ث (۷۱/۲ میلی گرم در ۱۰۰ گرم وزن تر) در تیمار ۴۰۰ میلی گرم در لیتر ال-آرژنین مشاهده شد. سفتی بافت در میوه‌های تیمار شده نسبت به شاهد به طور معنی داری افزایش یافت. بیشترین میزان فنل کل (۳۰۰/۶۳ میلی گرم اسیدگالیک در ۱۰۰ گرم وزن تر) در تیمار ۱۵۰ میلی گرم در لیتر نانوسیلیس مشاهده شد. تیمار ۱۰۰ میلی گرم در لیتر نانواکسید روی همراه با ۴۰۰ میلی گرم در لیتر ال-آرژنین باعث افزایش ۷۶/۶ درصدی محتوای فلاونوئید کل نسبت به شاهد گردید. بیشترین میزان آنتوسیانین با میزان ۰/۴۶۵ در تیمار ۲۰۰ میلی گرم در لیتر ال-آرژنین مشاهده شد. در کل نتایج نشان داد که کاربرد ترکیبی نانوذرات روی و سیلیس همراه با ال-آرژنین می‌تواند با تقویت شاخص‌های رشدی و متابولیسم ثانویه، کیفیت و کمیت میوه توت‌فرنگی رقم مونتری را افزایش دهد.

**واژه‌های کلیدی:** اندازه میوه، ریزمغذی، فنل کل، نانو تکنولوژی

شمران عطاالله، ح.، فرخزاد ع.ر.، رضاپور فرد ج. ۱۴۰۵. واکنش توت‌فرنگی رقم مونتری به کاربرد نانواکسید روی و سیلیس در ترکیب با ال-آرژنین از نظر ویژگی‌های رشدی، کیفی و فیزیکوشیمیایی میوه. تحقیقات کاربری خاک، جلد ۱۴، شماره ۲. صفحه ۱۱۹-۱۳۵

۱- دانشجوی دکتری گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ایران

۲- دانشیار گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ایران

۳- استادیار گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ایران

\* پست الکترونیک: [a.farokhzad@urmi.ac.ir](mailto:a.farokhzad@urmi.ac.ir)

## مقدمه

بهبود کیفیت میوه توت‌فرنگی نقش بسیار مهمی در افزایش بازارپسندی و ارزش اقتصادی آن دارد. در تولید توت‌فرنگی از انواع تیمارهای شیمیایی و تغذیه‌ای جهت بهبود خصوصیات کمی، کیفی و ارزش غذایی میوه استفاده شده است (Ayala-Zavala *et al.*, 2007; Saavedra *et al.*, 2022; Xiao *et al.*, 2022). در این میان کودها، نهاده‌های کشاورزی مهمی در افزایش عملکرد و کیفیت محصولات کشاورزی هستند (A. El-Henawy *et al.*, 2021; ALnaass *et al.*, 2018). استفاده از فرم نانو انواع ترکیبات کودی می‌تواند میزان مصرف کودها را کاهش داده و به‌علت جذب بهتر، باعث افزایش راندمان تولید شوند. این موضوع، می‌تواند جهت دستیابی به کشاورزی پایدار و سازگار با محیط زیست مفید باشد (Cui *et al.*, 2006; Penuelas *et al.*, 2023). مشخص شده است که کمبود انواع ریزمغذی‌ها از عوامل محدودکننده تولید در توت‌فرنگی می‌باشد. عناصری چون روی، بور و ... در بسیاری از فرایندهای فیزیولوژیکی و متابولیسم گیاهان نقش داشته و برای رشد و نمو طبیعی در گیاهان لازم می‌باشند. این عناصر در حد بسیار کم اثرات مطلوبی در گیاهان داشته و مقادیر کم و زیاد آن اثرات نامطلوب شدیدی بر گیاهان خواهد داشت (Reddy and Reddi, 1998).

عنصر روی برای فعالیت بسیاری از آنزیم‌ها مانند دهیدروژناز، پروتئیناز، پپتیداز و فسفوهیدرولاز ضروری بوده و در ساخته شدن تریپتوفان که جزیی از ساختمان برخی از پروتئین‌ها بوده و ترکیبی ضروری برای ساخته شدن هورمون رشد (اکسین‌ها مانند ایندول‌استیک اسید) می‌باشد، مهم است. کاهش هورمون رشد در گیاهان مبتلا به کمبود روی فاصله میان‌گره‌ها را کوتاه کرده و حالت ریزی غیرطبیعی برگ‌ها را ایجاد می‌کند (Bowler *et al.*, 1994; Srivastava and Gupta, 1996). مشخص شده است که عنصر روی نقش مهمی در فتوسنتز و آنزیم‌های مرتبط با فتوسنتز داشته و باعث بهبود میزان مواد جامد محلول و کاهش اسیدیته میوه می‌گردد (Abedy, 2001). نتایج پژوهشی نشان داده است که محلول پاشی نانوروی در

غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر باعث بهبود رشد رویشی و زودگلدهی در بوته‌های توت‌فرنگی شد (Saini *et al.*, 2021). همچنین محلول‌پاشی بوته‌های انگور با نانوروی باعث افزایش برخی شاخص‌های رویشی، سطح برگ، وزن تر و خشک برگ، محتوای ماده معدنی برگ، کربوهیدرات کل، کیفیت میوه، تعداد خوشه، وزن خوشه و عملکرد و محتوای آنتوسیانین پوست میوه گردید (El-Hak *et al.*, 2019).

سیلیس دومین عنصر فراوان در پوسته زمین است. با وجود حضور گسترده آن، تنها میزان کمی از سیلیکون موجود در خاک برای گیاهان در دسترس است (Epstein, 1994). در خاک، سیلیکون به اشکال مختلفی مانند محلول، جذب شده یا رسوب شده با اکسیدهای آهن و اکسیدهای آلومینیوم وجود دارد (Matichenkov and Bocharnikova, 2001). سیلیس به‌عنوان یک عنصر مفید اثرات مثبت مختلفی بر کاهش تبخیر و تعرق گیاه، افزایش مقاومت به تنش‌های زیستی و غیرزیستی و همچنین افزایش مولفه‌هایی نظیر کارایی فتوسنتزی، قطر ساقه، سطح برگ و قطر گل دارد (Fauteux *et al.*, 2005; Liang *et al.*, 2005). سیلیس از طریق القای متابولیت‌های ثانویه، مسیر بیوسنتز جیبرلیک اسید و جلوگیری از تخریب کلروفیل، تحمل به خشکی را در گیاهان بهبود می‌بخشد (Mushtaq *et al.*, 2024). تأثیرات مثبت سیلیس بر کیفیت میوه و افزایش مقاومت آن به دو طریق مستقیم، از طریق القاء مسیرهای بیوسنتزی متابولیت‌هایی از قبیل لیگنین و ترکیبات فنلی (Alhousari and Greger, 2018) و غیرمستقیم، از طریق القاء تولید ترکیبات فرار از قبیل جاسمونات نسبت داده شده است (Ye *et al.*, 2013). مطالعات زیادی نشان داده است که تیمار گیاهان با سیلیس می‌تواند به‌طور چشمگیری اثر تنش‌های زیستی و غیرزیستی مانند فلزهای سنگین، شوری، خشکی، سرما و یخ‌زدگی را کاهش دهد (Liang *et al.*, 2007; Luyckx *et al.*, 2021; Ali *et al.*, 2025). تأثیر مطلوب کاربرد خارجی ترکیبات سیلیس در بهبود خصوصیات کمی و کیفی میوه انار توسط عبداللہی و همکاران (Abdollahi *et al.*, 2024) نیز گزارش شده است.

شرایط کم محلول‌دهی ثبت شد. با توجه به اهمیت بهبود خصوصیات کمی، کیفی و خصوصیات آنتی اکسیدانی میوه توت‌فرنگی و افزایش بازارپسندی آن در پژوهش حاضر تأثیر محلول‌پاشی برگی نانواکسید روی و نانوسیلیس به تنهایی و در ترکیب با غلظت‌های مختلف اسیدآمینه ال-آرژنین روی میوه توت‌فرنگی رقم مونتری مورد ارزیابی قرار گرفت.

### مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در یک گلخانه تجاری در شهر ارومیه با شرایط دمایی روزانه ۲۰-۱۷ و دمای شبانه ۱۵-۱۳ درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۵۵ الی ۶۰ درصد و شدت نور ۵۰۰ الی ۶۰۰ میکرومول بر مترمربع در ثانیه انجام شد. نشاءهای توت‌فرنگی رقم مونتری پس از رفع نیاز سرمایی در بسترهای پلاستیکی حاوی پرلیت و کوکوپیت با نسبت ۱:۱ کشت شده (قبل از کشت، ریشه‌ها به مدت ۱۵ الی ۲۰ ثانیه با محلول قارچ‌کش ضدعفونی شدند) و برگ‌های پیر آن هرس شدند. سپس بوته‌ها از نظر اندازه و یکنواختی تفکیک گردیده و بوته‌های آسیب دیده و غیریکنواخت حذف و بوته‌های سالم به منظور اعمال تیمارها مورد استفاده قرار گرفتند. برای تغذیه از محلول غذایی تجاری مرسوم برای توت‌فرنگی استفاده شد. در طول آزمایش مبارزه با آفات و بیماری‌ها به‌طور معمول و یکنواخت برای همه بوته‌ها اعمال شد. جهت ثبت EC بسترکشت، اجازه داده شد تا ۱۵ درصد محلول غذایی در هر دوره محلول‌دهی به‌صورت زهاب از محیط ریشه بوته‌ها خارج شود. پس از شروع گلدی و ابتدای تشکیل میوه، تیمارهای محلول‌پاشی به شرح جدول ۱ روی بوته‌های توت‌فرنگی انجام شد. آزمایش به‌صورت طرح کاملاً تصادفی با ۹ تیمار در ۳ تکرار (برای هر واحد آزمایشی ۱۰ بوته توت‌فرنگی کشت شد) انجام شد. محلول‌پاشی در ۳ مرتبه به فاصله ۱۵ روز یکبار تا برداشت میوه انجام گرفت. میوه‌هایی که بیش از ۷۰ درصد رنگ گرفته بودند، برداشت شده و برای ارزیابی شاخص‌های کمی و کیفی به آزمایشگاه‌های گروه علوم و مهندسی باغبانی دانشگاه ارومیه منتقل شدند.

آرژنین (Arginine) یکی از بیست اسیدآمینه اصلی یاخسته‌های زنده است، این اسیدآمینه دارای عملکرد متنوعی در سلول‌های زنده بوده و یک فرم ذخیره‌ای و انتقالی مهم برای نیتروژن آلی در گیاهان محسوب می‌شود. علاوه بر کارایی آن به‌عنوان جزء اصلی پروتئین، یک متابولیت ضروری برای بسیاری از فرآیندهای سلولی و رشدی است (Winter et al., 2015). آرژنین به‌عنوان پیش‌ماده تولید بسیاری از مولکول‌های سیگنالی‌نگ مانند نیتریک‌اکسید، پلی‌آمین‌ها (پوترسین، اسپرمین و اسپرمیدین) گلوتامات، اسید آمینوبوتیریک و پرولین، نقش مثبتی در بهبود کیفیت انباری برخی محصولات باغبانی داشته است. امروزه ال-آرژنین به‌عنوان افزودنی غذایی بی‌خطر برای استفاده انسان به رسمیت شناخته شده است (Shu et al., 2020). مطالعات نشان داده است که آرژنین سنتز هورمون‌های گیاهی مرتبط با گلدی و میوه‌دهی را افزایش می‌دهد (El Naggar et al., 2013; Abd-Elkader et al., 2020). گزارش شده است که کاربرد ال-آرژنین نقش موثری در حفظ فنل و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی میوه انار در مدت انبار و همچنین کاهش فعالیت آنزیم پلی‌فنل‌اکسیداز در میوه‌های تیمار شده داشت (Hossini Molla et al., 2022). در یک مطالعه اسیدآمینه آرژنین روی توت‌فرنگی رقم گلویتا مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که تیمار ال-آرژنین با ایجاد کمترین کاهش وزن، عمر پس از برداشت و کیفیت میوه را افزایش داد و باعث بهبود خصوصیات کیفی میوه گردید (Bidaki et al., 2017). مصلحتی‌فرد و حسن‌پور (Maslahati fard & Hassanpoor, 2023) با مطالعه تأثیر محلول‌پاشی ال-آرژنین (صفر، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر) روی بوته‌های توت‌فرنگی رقم آلبیون در شرایط کمبود آبیاری و محلول غذایی، نشان دادند که بیشترین میزان مواد جامد محلول، طعم میوه و سفتی بافت میوه در تیمار آرژنین با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر، در شرایط محلول‌دهی نرمال ثبت شد. همچنین بیشترین میزان فنل و فلاونوئید کل در تیمار آرژنین با غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر، در سطح محلول‌دهی نرمال به‌دست آمد. بیشترین میزان آنتوسیانین کل، ویتامین ث و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی کل، در تیمار آرژنین با غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر، در

جدول ۱- تیمارهای مورد استفاده در پژوهش حاضر

Table 1. Treatments used in the present study

| treatments | Zinc oxide nanoparticle<br>(mg/L) | Nanosilica<br>(mg/L) | L-arginine<br>(mg/L) |
|------------|-----------------------------------|----------------------|----------------------|
| T1         | 0                                 | 0                    | 0                    |
| T2         | 100                               | 0                    | 0                    |
| T3         | 0                                 | 150                  | 0                    |
| T4         | 0                                 | 0                    | 200                  |
| T5         | 100                               | 0                    | 200                  |
| T6         | 0                                 | 150                  | 200                  |
| T7         | 0                                 | 0                    | 400                  |
| T8         | 100                               | 0                    | 400                  |
| T9         | 0                                 | 150                  | 400                  |

## شاخص‌های رشدی میوه

به منظور اندازه گیری وزن تر میوه از ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۱ گرم و به منظور اندازه گیری طول و عرض میوه نیز از کولیس دیجیتالی استفاده شد.

## شاخص‌های رنگی میوه

شاخص‌های مربوط به رنگ شامل شاخص روشنایی (L)، شاخص قرمزی (a) و شاخص زردی (b) با کمک دستگاه هانترلب (مدل Colorimeter, Minolta CR-400, Japan) ارزیابی شد. برای هر تکرار ۵ میوه انتخاب و پس از ارزیابی شاخص‌های رنگ، میانگین آنها برای تکرار مورد نظر ثبت شد.

## شاخص‌های فیزیولوژیکی و فیزیوشیمیایی

برای اندازه‌گیری میزان مواد جامد محلول از رفاکتومتر دستی مدل ATAGO استفاده شد (جلیلی‌مزدی، ۱۳۸۹). میزان اسیدهای آلی با روش تیتراسیون با محلول ۰/۱ نرمال NaOH تا رسیدن به pH=۸/۲ محاسبه گردید (Ayala-Zavala et al., 2007). برای تعیین ویتامین ث از روش تیتراسیون در حضور یدورپتاسیم و معرف نشاسته ۱ درصد استفاده گردید (Majedi, 1994). سفتی بافت میوه‌ها با کمک دستگاه سفتی‌سنج مدل TA. XT Plus Stable Micro System UK ساخت شرکت استیبل میکروسیستم انگلستان اندازه‌گیری شد. برای اینکار سرعت جابجایی پروب روی ۱ میلی‌متر بر ثانیه تنظیم شد. آزمون نفوذ فشار با میزان جابجایی پروب ۸ میلی‌متر با قطر ۲ میلی‌متر

(معمولاً با کد P/2 شناخته می‌شود) انجام گرفت و میوه‌ها به‌صورت عرضی تحت نفوذ پروب قرار گرفتند. مقادیر نیروی نفوذ با دقت ۰/۱ گرم، جابجایی پروب با دقت ۰/۰۰۱ میلی‌متر و زمان نفوذ با دقت ۰/۰۰۱ ثانیه ثبت گردید. حداکثر فشاری که برحسب نیوتن در اثر مقاومت بافت میوه به نوک سفتی‌سنج وارد آمد از روی دستگاه قرائت گردید (Vargas et al., 2006). برای اندازه‌گیری فنل و فلاونوئید کل از عصاره متانولی ۸۵ درصد استفاده شد. برای فنل کل از معرف فولین سیوکالچو (Du et al., 2009) و برای ارزیابی میزان فلاونوئید کل از معرف آلومینیوم کلراید استفاده شد (Shin et al., 2014). به‌منظور اندازه‌گیری میزان آنتوسیانین از بافر استخراج متانول (2.98 v/v) HCV استفاده شد. در ازای هر ۵۰۰ میلی‌گرم بافت میوه، ۲ میلی‌لیتر بافر استخراج استفاده شد. ۰/۵ میلی‌لیتر از عصاره ته نشین شده به درون لوله‌ای آزمایش ریخته شد و توسط بافرهای MES (2-[N.morpholino] -ethanesulfonat) با pHهای متفاوت ۱ و ۴/۵ به‌طور جداگانه به حجم ۵ میلی‌لیتر رسانده شد. پس از ۵ ساعت نگهداری در یخچال، جذب در طول‌موج ۵۵۰ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت شد (Wrolstad et al., 1976).

## واکاوی آماری داده‌ها و نرم‌افزارهای مورد استفاده

برای انجام تجزیه واریانس و مقایسه میانگین صفات مورد ارزیابی، از نرم‌افزار SAS نسخه 9.4 استفاده شد. مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. برای رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel نسخه‌ی ۲۰۱۶ استفاده گردید.

## نتایج و بحث

(TSS)، اسیدیته قابل تیتراسیون (TA)، ویتامین ث، سفتی بافت میوه، شاخص رنگ a، میزان فنل و فلاونوئید کل و میزان آنتوسیانین معنی دار بود. همچنین نتایج نشان داد که اثر تیمارهای مورد استفاده بر میزان عرض میوه و شاخص-های رنگی b و L معنی دار نشد (جدول ۲ و ۴).

با توجه به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها مشخص شد که اثر تیمارهای مورد استفاده بر شاخص‌های رشدی و فیزیوشیمیایی مورد ارزیابی در میوه توت‌فرنگی رقم مونتری از قبیل وزن میوه، طول میوه، مواد جامد محلول

جدول ۲- تجزیه واریانس تأثیر تیمارهای نانواکسید روی و نانوسیلیس در ترکیب با ال-آرژنین بر برخی ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیکی میوه توت‌فرنگی رقم مونتری

Table 2. Variance analysis of the effect of nano zinc oxide and silica in combination with L-arginine on some morpho-physiological characteristics of Monterey strawberry fruit

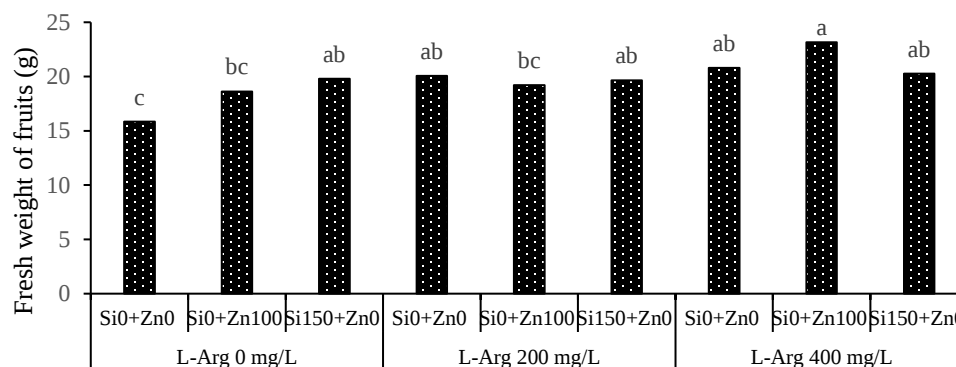
| Source of variation | Degree of freedom | Mean squares |         |                    |       |          |           |                |
|---------------------|-------------------|--------------|---------|--------------------|-------|----------|-----------|----------------|
|                     |                   | Fresh weight | Length  | Diameter           | TSS   | TA       | Vitamin C | Fruit firmness |
| Treatments          | 8                 | 11.24*       | 11.33** | 2.91 <sup>ns</sup> | 1.09* | 0.0053** | 125.75**  | 0.002**        |
| Error               | 18                | 3.57         | 2.71    | 8.54               | 0.33  | 0.001    | 33.23     | 0.0004         |
| CV (%)              |                   | 9.58         | 4.02    | 9.67               | 8.76  | 5.47     | 9.25      | 11             |

ns, \* and \*\*: non-significant, significant at 5% and 1% level, respectively

## وزن تر، طول و عرض میوه

افزایش می‌تواند حاصل اثرات فیزیولوژیکی، تغذیه‌ای و تنظیم‌کننده رشد این ترکیبات در مسیرهای مختلف متابولیکی گیاه باشد. بر اساس نتایج مقایسه میانگین مشخص شد که طول میوه در اثر تیمارهای مورد استفاده روندی افزایشی را در مقایسه با شاهد نشان داد. بیشترین طول میوه (۴۴/۰۳ میلی‌متر) در تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانواکسیدروی و غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر ال-آرژنین مشاهده شد که منجر به افزایش ۱۵/۷۶ درصدی طول میوه در مقایسه با شاهد شد. کمترین طول میوه (۳۷/۰۹ میلی‌متر) نیز در شاهد ثبت شد (شکل ۲).

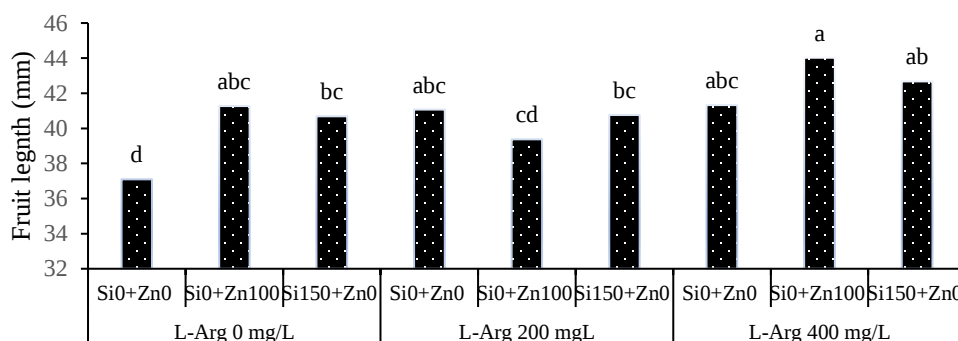
نتایج مقایسه میانگین داده‌ها بیانگر افزایش وزن تر میوه توت‌فرنگی در اثر کاربرد تیمارهای نانوسیلیس، نانواکسید روی و ال-آرژنین بود. بیشترین تأثیر در تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانواکسید روی، بدون کاربرد نانوسیلیس و غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر ال-آرژنین مشاهده شد که منجر به افزایش ۳۱/۶۳ درصدی وزن تر میوه در مقایسه با شاهد شد (شکل ۱). نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد نانواکسید روی، نانوسیلیس و ال-آرژنین به‌صورت مجزا و به‌ویژه در ترکیب با یکدیگر، منجر به افزایش معنی‌دار وزن تر میوه توت‌فرنگی در مقایسه با تیمار شاهد شدند. این



شکل ۱- مقایسه میانگین تأثیر تیمارهای نانواکسیدروی و سیلیس همراه با غلظت‌های مختلف ال-آرژینین بر میزان وزن تر میوه

توت‌فرنگی رقم مونتری (حروف غیرمشابه بیانگر معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون چنددامنه‌ای دانکن می‌باشد)

Figure1. Means comparison of the effect of nano zinc oxide and silica in combination with L-arginine on fruit fresh weight of Monterey strawberry fruit (Non-similar letters indicate significant difference at the 5% probability level using the Duncan's test)



شکل ۲- مقایسه میانگین تأثیر تیمارهای نانواکسیدروی و سیلیس همراه با غلظت‌های مختلف ال-آرژینین بر میزان طول میوه

توت‌فرنگی رقم مونتری (حروف غیرمشابه بیانگر معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون چنددامنه‌ای دانکن می‌باشد)

Figure2. Means comparison of the effect of nano zinc oxide and silica in combination with L-arginine on fruit length of Monterey strawberry fruit (Non-similar letters indicate significant difference at the 5% probability level using the Duncan's test)

(۲۰۲۳) نیز گزارش شده است که اذعان داشتند عنصر روی منجر به افزایش وزن میوه انگور می‌شود که با نتایج مطالعه حاضر در یک راستا است. نانوسیلیس با تقویت دیواره سلولی، افزایش کارایی جذب عناصر غذایی و کاهش تعرق، شرایط فیزیولوژیکی بهتری برای رشد سلول‌های میوه فراهم می‌آورد. سیلیس همچنین در تقویت مسیرهای هورمونی و بهبود مقاومت گیاه به تنش، زمینه‌ساز توسعه بهتر میوه می‌شود (Ahmad *et al.*, 2024). سیلیس با کاهش تعرق، به حفظ تعادل آبی و فشار تورژسانس در سلول‌های زایشی و ذخیره‌ای کمک کرده و منجر به افزایش اندازه و وزن میوه می‌شود (Wang *et al.*, 2021). اسیدآمینه ال-آرژینین،

نانوذرات اکسیدروی با فراهم‌سازی عنصر روی که به‌عنوان کوفاکتور بسیاری از آنزیم‌ها شناخته می‌شود، در تنظیم فعالیت آنزیم‌های دخیل در تقسیم و توسعه سلولی مانند RNA پلی‌مراز، کربنیک‌آنهیدراز و سوپراکسیددیسموتاز نقش دارد (Costa *et al.*, 2023). این فعالیت‌ها به‌صورت غیرمستقیم به تحریک رشد بافتی و افزایش طول سلول‌های میوه کمک می‌کنند. همچنین نانوذرات به‌دلیل نسبت سطح به حجم بالا، قابلیت انتقال سریع‌تر در بافت‌های گیاهی را داشته و با فعال‌سازی مسیرهای فیزیولوژیکی باعث افزایش رشد میوه می‌شوند (Rastogi *et al.*, 2017). افزایش وزن میوه در اثر کاربرد عنصر روی توسط محبی و همکاران

به‌صورت غیرمستقیم در انتقال مواد فتوسنتزی مؤثر باشند (Pakkish & Mohammadrezakhani, 2022) که می‌توانند علت احتمالی افزایش میزان TSS در مطالعه حاضر نیز باشد. در مقابل، نانوذرات اکسیدروی و نانوسیلیس نیز نسبت به شاهد در افزایش TSS مؤثر بودند که نشان‌دهنده نقش آن‌ها در بهبود فتوسنتز، متابولیسم و انتقال مواد غذایی به میوه است (Seleiman *et al.*, 2023). نانوذرات روی با افزایش فعالیت آنزیم‌های دخیل در فتوسنتز مانند کربنیک آنهیدراز (Liu *et al.*, 2025) و نانوسیلیس با بهبود وضعیت آبی گیاه (Li *et al.*, 2025)، توانسته‌اند شرایط فیزیولوژیکی مناسبی برای تجمع مواد محلول در میوه ایجاد کنند. تأثیر مثبت روی در میزان مواد جامد محلول در مطالعه محبی و همکاران (Mohebbi *et al.*, 2022) در انگور و مک‌لاد و همکاران (Maklad *et al.*, 2020) در میوه انبه نیز گزارش شده است.

#### اسیدهای آلی (TA)

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها بیانگر کاهش میزان TA در اثر کاربرد تیمارهای نانوسیلیس، نانوآکسیدروی و ال-آرژنین بود. همانطور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود کمترین میزان TA در تیمار ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیس و غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر ال-آرژنین و بدون کاربرد نانوآکسیدروی و بیشترین میزان TA در تیمار شاهد مشاهده شد. کاهش TA در تیمارهای حاوی ال-آرژنین به احتمال زیاد ناشی از افزایش مصرف اسیدهای آلی در مسیرهای تنفسی و تسریع فرآیند رسیدن طبیعی میوه می‌باشد. ال-آرژنین از طریق تولید نیتریک‌اکسید موجب تحریک آنزیم‌هایی مانند مالات دهیدروژناز و سیتрат سنتاز می‌شود که در مسیرهای متابولیسم اسیدهای آلی نقش دارند (Neill *et al.*, 2008). این فرآیند منجر به تجزیه اسیدهای آلی و در نتیجه کاهش TA می‌گردد. همچنین، آرژنین از طریق بهبود عملکرد فتوسنتزی و افزایش انتقال کربوهیدرات‌ها به میوه، ممکن است موجب تغییر نسبت قند به اسید شود که خود باعث کاهش اسیدیته نهایی میوه خواهد بود (Yu *et al.*, 2024). این تغییر در طعم و ساختار میوه، علاوه بر بهبود کیفیت مصرفی، ممکن است نقش مهمی در افزایش بازارپسندی توت‌فرنگی ایفا

به‌عنوان یک اسیدآمین نیمه ضروری و پیش‌ماده سنتز نیتریک‌اکسید و پلی‌آمین‌ها، تأثیر چشم‌گیری در فرآیند رشد سلولی دارد. نیتریک‌اکسید با افزایش نفوذپذیری دیواره سلولی و تحریک انبساط سلولی، موجب کشیدگی بیشتر بافت‌های زایشی می‌شود (Neill *et al.*, 2008). همچنین پلی‌آمین‌ها (همچون پوترسین و اسپرمیدین) با نقش تنظیمی در چرخه تقسیم سلولی و تحریک سنتز RNA و پروتئین، زمینه‌ساز افزایش طول سلول‌ها و در نهایت افزایش طول میوه هستند (Kamiab *et al.*, 2020). این اثر تقویتی در تیمار آرژنین ممکن است ناشی از جذب بهتر عناصر غذایی، تحریک سنتز جیبرلین (هورمون‌های افزایش‌دهنده رشد طولی) و همچنین افزایش سنتز ترکیبات متابولیک مرتبط با توسعه میوه باشد. بهبود شاخص رشدی میوه با تیمار ال-آرژنین در مطالعات سایر پژوهشگران نیز گزارش شده است (Hasan *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2021; Khan *et al.*, 2023).

#### شاخص‌های فیزیکوشیمیایی

##### مواد جامد محلول (TSS)

مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که تیمارهای مورد استفاده منجر به افزایش معنی‌دار TSS در مقایسه با شاهد شدند. بین تیمارهای مورد استفاده، ال-آرژنین به‌ویژه در غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر تأثیر بیشتری در افزایش میزان TSS داشت (جدول ۲). مواد جامد محلول معمولاً شامل قندهای ساده (گلوکز، فروکتوز، ساکارز)، اسیدهای آلی و برخی ترکیبات آنتی‌اکسیدانی است که به‌عنوان شاخصی مهم برای ارزیابی کیفیت میوه در برداشت و بازارپسندی شناخته می‌شود (El-Beltagi *et al.*, 2022). ال-آرژنین از طریق افزایش سنتز نیتریک‌اکسید تحریک مسیرهای متابولیکی مرتبط با انتقال قندها، می‌تواند موجب افزایش انتقال ترکیبات فتوسنتزی به اندام‌های زایشی، به‌ویژه میوه شود (Khan *et al.*, 2023). همچنین، نیتریک‌اکسید نقش مهمی در تنظیم فعالیت آنزیم‌های دخیل در مسیر گلیکولیز و سنتز ساکارز دارد و از این طریق سبب تجمع بیشتر قندها و افزایش TSS می‌گردد (Elam *et al.*, 2022). پلی‌آمین‌های حاصل از آرژنین نیز با افزایش مقاومت سلول به تنش و بهبود عملکرد آوندی، می‌تواند

کیفیت تغذیه‌ای میوه نقش دارد (Fenech *et al.*, 2019). افزایش ویتامین ث در توت‌فرنگی با افزایش ارزش اقتصادی، پایداری پس از برداشت و خواص دارویی همراه است (Ali and Serce, 2022). ال-آرژنین با ورود به مسیرهای متابولیکی مرتبط با سنتز نیتریک‌اکسید و پلی‌آمین‌ها، موجب تحریک فعالیت آنزیم‌های دخیل در مسیر آسکوربات-گلوتاتیون می‌شود که نقش اصلی در بیوسنتز و بازسازی ویتامین ث دارد (Hasanuzzaman *et al.*, 2019). از طرف دیگر، نیتریک‌اکسید از طریق تنظیم بیان ژن آنزیم‌های کلیدی مانند گالاکتونولاکتون‌دهیدروژناز، باعث افزایش سنتز مستقیم ویتامین ث در بافت‌های گیاهی می‌شود (Rodríguez-Ruiz *et al.*, 2017). در تأیید نتایج مطالعه حاضر Pakkish و Mohammadrezakhani (2022) نیز افزایش ویتامین ث میوه گیلاس را در کاربرد ال-آرژنین گزارش کردند. اگرچه تیمارهای نانوآکسید روی و سیلیس نیز نسبت به شاهد افزایش در ویتامین ث را سبب شدند، اما اثر آن‌ها به اندازه ال-آرژنین ۴۰۰ میلی گرم در لیتر نبود. نانوذرات روی می‌توانند با تحریک آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز به صورت غیرمستقیم باعث کاهش تنش اکسیداتیو و حفظ سطح ویتامین ث در سلول شوند (Geremew *et al.*, 2023). همچنین نانوسیلیس با تقویت دیواره سلولی و کاهش نشت یونی، پایداری آنتی‌اکسیدان‌ها را افزایش می‌دهد (Ali *et al.*, 2020).

#### سفتی بافت میوه

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که تیمارهای مورد استفاده به طور معنی‌داری سفتی بافت میوه توت‌فرنگی رقم مونتری را نسبت به شاهد افزایش دادند. بیشترین میزان سفتی بافت میوه در تیمار ۱۵۰ میلی گرم در لیتر نانوسیلیس (۰/۲۲۶ نیوتن) و ۱۰۰ میلی گرم در لیتر نانوآکسید روی (۰/۲۱ نیوتن) مشاهده شد (جدول ۲). سفتی بافت یکی از مهم‌ترین شاخص‌های کیفی میوه‌های تازه از جمله ریزمیوه‌ها محسوب می‌شود که مستقیماً بر قابلیت نگهداری، بازارپسندی و کاهش ضایعات پس از برداشت اثر می‌گذارد. سفتی میوه تحت تأثیر ساختار دیواره

کند. در مقابل، اگرچه نانوذرات اکسیدروی و نانوسیلیس نیز در برخی تیمارها موجب کاهش TA نسبت به شاهد شده‌اند، اما تیمارهایی که فاقد این نانوذرات بودند، تأثیر بیشتری در کاهش TA داشتند. این تفاوت ممکن است به علت اثر غالب آرژنین در مسیرهای تنظیم رشد و رسیدگی باشد (Alcázar *et al.*, 2010)، در حالی که نانوذرات بیشتر بر ویژگی‌های ساختاری و تغذیه‌ای تأثیرگذارند و بر شاخص‌های مربوط به رسیدگی بیوشیمیایی تأثیر کمتری دارد. با این حال، کاهش TA در تیمارهای نانو (نسبت به شاهد) نیز نشان‌دهنده نقش مثبت آن‌ها در تنظیم متابولیسم و بهبود شرایط فیزیولوژیکی میوه است. نانوذرات اکسید روی از طریق فعال‌سازی آنزیم‌های دخیل در متابولیسم انرژی (Vafae Moghadam *et al.*, 2021) و نانوسیلیس از طریق بهبود تعادل آبی و ساختار سلولی (Ghorbanpour *et al.*, 2020)، به طور غیرمستقیم فرآیند رسیدن میوه را تسهیل کرده‌اند. در تأیید نتایج مطالعه حاضر Sanches و Feitosa (2025) Feitosa گزارش کردند که کاربرد ال-آرژنین روی میوه پاپایا منجر به کاهش اسیدیته قابل تیتراسیون شد، همچنین مکلا و همکاران (Maklad *et al.*, 2020) کاهش میزان اسیدیته قابل تیتراسیون را در میوه انبه در اثر کاربرد عنصر روی گزارش کردند. السباق و همکاران (۲۰۲۰) نیز کاهش میزان اسیدیته قابل تیتراسیون را در اثر کاربرد سیلیکات‌پتاسیم در زردآلو گزارش کردند که با نتایج مطالعه حاضر در یک راستا می‌باشد.

#### ویتامین ث

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها بیانگر افزایش ویتامین ث در اثر کاربرد تیمارهای ال-آرژنین، نانوسیلیس و نانوآکسیدروی بود. همانطور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، بیشترین میزان ویتامین ث با میزان ۷۱/۲ میلی گرم اسیدآسکوربیک در ۱۰۰ گرم وزن تر در تیمار ۴۰۰ میلی گرم در لیتر ال-آرژنین مشاهده شد، در حالیکه کمترین میزان ویتامین ث مربوط به تیمار شاهد بود. ویتامین ث یکی از مهم‌ترین آنتی‌اکسیدان‌های محلول در آب در میوه‌ها است که در خنثی‌سازی رادیکال‌های آزاد، تقویت سیستم دفاعی گیاه، تأخیر در پیری سلولی و بهبود

ممکن است از اکسیداسیون و تخریب ترکیبات دیواره جلوگیری کرده و در تثبیت بافت میوه مؤثر باشد (Mahdavi *et al.*, 2022). نتایج حاضر با یافته‌های السباق و همکاران (Elsabagh *et al.*, 2020) که گزارش کردند تیمار نانوسیلیس موجب حفظ بافت و کاهش نرم‌شدگی میوه زردآلو در انبار شد، هم‌راستا است. همچنین عبدل ستار و همکاران (Abdel-Sattar *et al.*, 2024) اثر مثبت نانو روی را در حفظ سفتی و تأخیر در پیری میوه‌های انبه گزارش کردند

سلولی، میزان پکتین و فعالیت آنزیم‌هایی مانند پلی گالاتوروناز، پکتین‌استراز و سلولاز قرار دارد (Chen *et al.*, 2015). در پژوهش حاضر تیمار نانوسیلیس در غلظت ۱۵۰ میلی گرم در لیتر و تیمار نانوآکسید روی در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر بیشترین تأثیر را در سفتی میوه داشتند. این افزایش سفتی ممکن است به دلیل نقش نانوسیلیس در تقویت دیواره سلولی و ایجاد پیوندهای قوی‌تر در شبکه پکتینی باشد، زیرا سیلیس در دیواره سلولی تجمع یافته و سبب افزایش مقاومت مکانیکی می‌شود (Ali *et al.*, 2020). از سوی دیگر، نانوآکسید روی با خواص آنتی‌اکسیدانی خود

جدول ۳- مقایسه میانگین تأثیر تیمارهای نانوآکسید روی و سیلیس همراه با غلظت‌های مختلف ال-آرژنین بر برخی شاخص‌های

فیزیکوشیمیایی میوه توت‌فرنگی رقم مونتری

Table 3. Means comparison of the effects of nano zinc oxide and silica in combination with L-arginine on some physicochemical characteristics of Monterey strawberry fruit

| Treatments (mg/L)    | TSS<br>(Brix)       | TA<br>(mg/100 g FW)  | VC<br>(mg/100g FW)   | Fruit<br>firmness (N) | Redness<br>index (a*) |
|----------------------|---------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Si0+Zn0+ L-Arg0      | 4.66 <sup>d</sup>   | 0.671 <sup>a</sup>   | 51.9 <sup>c</sup>    | 0.153 <sup>c</sup>    | 27.84 <sup>c</sup>    |
| Si0+Zn100+ L-Arg0    | 5 <sup>cd</sup>     | 0.618 <sup>abc</sup> | 59.54 <sup>abc</sup> | 0.21 <sup>a</sup>     | 30.36 <sup>a</sup>    |
| Si150+Zn0+ L-Arg0    | 6.33 <sup>ab</sup>  | 0.605 <sup>bcd</sup> | 69.22 <sup>ab</sup>  | 0.226 <sup>a</sup>    | 30.88 <sup>a</sup>    |
| Si0+Zn0+ L-Arg200    | 6 <sup>abc</sup>    | 0.542 <sup>e</sup>   | 58.6 <sup>bc</sup>   | 0.167 <sup>c</sup>    | 30.37 <sup>a</sup>    |
| Si0+Zn100+ L-Arg200  | 5.83 <sup>abc</sup> | 0.58 <sup>cde</sup>  | 61.33 <sup>abc</sup> | 0.173 <sup>bc</sup>   | 31.81 <sup>a</sup>    |
| Si150+Zn0+ L-Arg200  | 5.5 <sup>bcd</sup>  | 0.654 <sup>ab</sup>  | 70.16 <sup>a</sup>   | 0.17 <sup>bc</sup>    | 30.57 <sup>a</sup>    |
| Si0+Zn0+ L-Arg400    | 6.6 <sup>a</sup>    | 0.613 <sup>a-d</sup> | 71.2 <sup>a</sup>    | 0.204 <sup>ab</sup>   | 31.14 <sup>a</sup>    |
| Si0+Zn100+ L-Arg400  | 6 <sup>abc</sup>    | 0.595 <sup>b-e</sup> | 58.96 <sup>bc</sup>  | 0.159 <sup>c</sup>    | 30.54 <sup>a</sup>    |
| Si150+Zn0 + L-Arg400 | 5.8 <sup>abc</sup>  | 0.554 <sup>de</sup>  | 59.57 <sup>abc</sup> | 0.171 <sup>bc</sup>   | 30.32 <sup>a</sup>    |

Non-identical letters in each column indicate a significant difference between the means at the 5% probability level with the Duncan's test.

متابولیت‌های ثانویه (مخصوصاً فنل‌پروپانونید) و افزایش تولید نیتریک‌آکسید می‌تواند سنتز آنتوسیانین‌ها را افزایش دهد که مستقیماً با رنگ قرمز پوست میوه در ارتباط است (Nilprapruck, 2020). با این حال در مطالعه حاضر در غلظت‌های بالا (۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر) ال-آرژنین، کاهش در میزان آنتوسیانین اتفاق افتاد که نشان‌دهنده وابسته بودن تأثیر ال-آرژنین به غلظت مورد استفاده است. نانوآکسید روی نیز به دلیل اندازه نانو، قابلیت جذب بالایی داشته و می‌تواند به سرعت در بافت گیاهی نفوذ کرده و از طریق افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و آنزیم‌های دخیل در سنتز رنگ‌دانه‌ها مثل فنیل‌آلانین‌آمونیلایز (PAL) و چالکون‌سینتاز (CHS) منجر به تحریک تولید رنگ‌دانه شود (Mahdavi *et al.*, 2022).

#### شاخص‌های رنگی میوه

رنگ میوه یکی از مهم‌ترین شاخص‌های کیفیت ظاهری در توت‌فرنگی است که به طور مستقیم بر قابلیت بازاریابی، پذیرش مصرف‌کننده و مرحله رسیدگی میوه اثر دارد. در این مطالعه، شاخص رنگ قرمز (a\*) در تمامی تیمارهای آزمایشی نسبت به شاهد به طور معنی‌داری بالا بود که نشان‌دهنده افزایش شدت رنگ قرمز در سطح پوست میوه در تیمارهای مورد استفاده بود. بیشترین میزان شاخص a\* در تیمار ال-آرژنین ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر همراه با ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوآکسید روی مشاهده شد. این ترکیب مؤثر، احتمالاً از طریق تحریک هم‌زمان مسیرهای سنتز رنگ‌دانه و تنظیم رشد سلولی پوست میوه منجر به افزایش رنگ قرمز شده است. ال-آرژنین با تأثیر روی مسیرهای

۱۰۰ گرم وزن تر) در تیمار ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیس مشاهده شد؛ هر چند با تمام تیمارهای مورد بررسی به جز تیمار شاهد دارای اختلاف معنی‌داری از لحاظ آماری نبود و کمترین میزان فنل کل در تیمار شاهد مشاهده شد (شکل ۳).

**محتوای فنل و فلاونوئید کل و آنتوسیانین**  
نتایج مقایسه میانگین داده‌ها بیانگر افزایش معنی‌دار محتوای فنل و فلاونوئید کل و میزان آنتوسیانین در اثر تیمارهای مورد استفاده در مقایسه با تیمار شاهد بود. بیشترین میزان فنل کل (۳۰۰/۶۳ میلی‌گرم اسیدگالیک در

**جدول ۴- تجزیه واریانس تأثیر تیمارهای نانواکسید روی و نانوسیلیس در ترکیب با ال-آرژینین بر برخی ویژگی‌های رنگی و فیتوشیمیایی میوه توت‌فرنگی رقم مونتری**

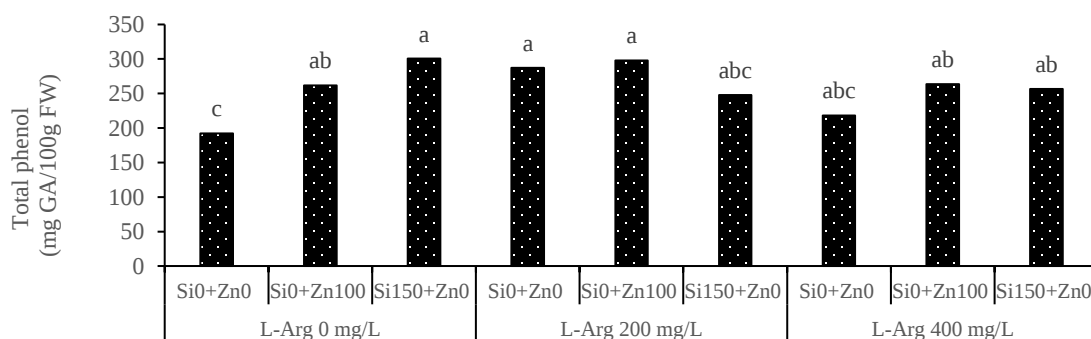
Table 4. Variance analysis of the effect of nano zinc oxide and silica in combination with L-arginine on color index and phytochemical characteristics of Monterey strawberry fruit

| Source of variation | Degree of freedom | Mean squares        |       |                    |               |                  |             |
|---------------------|-------------------|---------------------|-------|--------------------|---------------|------------------|-------------|
|                     |                   | L*                  | a*    | b*                 | Total phenols | Total flavonoids | Anthocyanin |
| Treatments          | 8                 | 13.22 <sup>ns</sup> | 3.51* | 3.64 <sup>ns</sup> | 38669.37*     | 21.92*           | 0.025**     |
| Error               | 18                | 5.37                | 1.14  | 2.02               | 1056.25       | 6.49             | 0.006       |
| CV (%)              |                   | 7.97                | 3.51  | 10.58              | 12.57         | 14.55            | 24.31       |

ns, \* and \*\*: non-significant, significant at 5% and 1% level, respectively

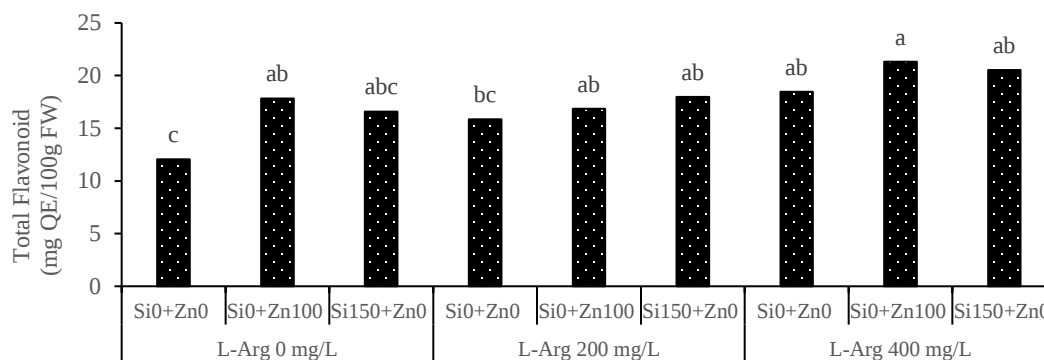
لیتر ال-آرژینین و تیمارهای ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانواکسید روی و ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیس بیشتر از سایر تیمارها بود. افزایش غلظت ال-آرژینین به ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر روندی کاهشی را در میزان آنتوسیانین ایجاد کرد. بیشترین میزان آنتوسیانین (۰/۴۶۵ میلی‌گرم در گرم وزن تر) در تیمار ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر ال-آرژینین مشاهده شد. تیمار ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر ال-آرژینین تأثیر منفی در میزان آنتوسیانین داشت (شکل ۵).

تأثیر تیمارهای ال-آرژینین در غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر در افزایش میزان فلاونوئید کل بارزتر بود و بالاترین محتوای فلاونوئید کل در تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانواکسید روی همراه با ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر ال-آرژینین به‌دست آمد؛ به طوری‌که افزایش ۷۶/۶ درصدی نسبت به تیمار شاهد داشت (شکل ۴). میزان آنتوسیانین در بیشتر تیمارهای مورد استفاده در مطالعه حاضر در مقایسه با شاهد به‌طور معنی‌داری بالاتر بود. تأثیر تیمار ۲۰۰ میلی‌گرم در



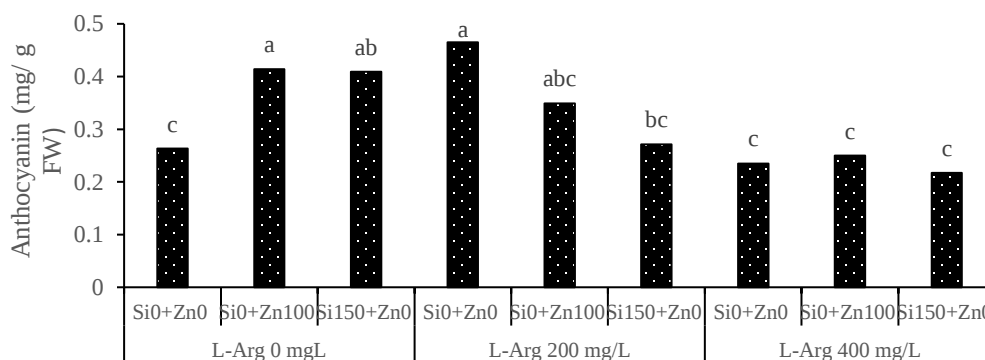
**شکل ۳- مقایسه میانگین تأثیر نانوسیلیس، نانواکسید روی و ال-آرژینین بر میزان فنل کل در توت‌فرنگی رقم مونتری. حروف غیرمشابه بیانگر معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون چنددامنه‌ای دانکن می‌باشد.**

Figure 3. Means comparison of the effect of nano zinc oxide and silica in combination with L-arginine on total phenol content of Monterey strawberry fruit (Non-similar letters indicate significant difference at the 5% probability level using the Duncan's test)



شکل ۴- مقایسه میانگین تاثیر نانوسیلیس، نانو اکسیدروی و ال-آرژینین بر میزان فلاونوئید کل در توت‌فرنگی رقم مونتری. حروف غیرمشابه بیانگر معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون چنددامنه‌ای دانکن می‌باشد.

Figure4. Means comparison of the effect of nano zinc oxide and silica in combination with L-arginine on total flavonoid content of Monterey strawberry fruit (Non-similar letters indicate significant difference at the 5% probability level using the Duncan's test)



شکل ۵- مقایسه میانگین تاثیر نانوسیلیس، نانو اکسیدروی و ال-آرژینین بر میزان آنتوسیانین در توت‌فرنگی رقم مونتری. حروف غیرمشابه بیانگر معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد با آزمون چنددامنه‌ای دانکن می‌باشد.

Figure5. Means comparison of the effect of nano zinc oxide and silica in combination with L-arginine on total Anthocyanin content of Monterey strawberry fruit (Non-similar letters indicate significant difference at the 5% probability level using the Duncan's test)

فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (Akanbi-Gada *et al.*, 2019) و آرژینین با تحریک مسیرهای متابولیکی مرتبط با سنتز فلاونوئیدها در سنتز ترکیبات فلاونوئیدی موثر هستند (Chen *et al.*, 2022). نانوسیلیس با تقویت دیواره سلولی و بهبود تحمل گیاه در برابر تنش‌های اکسیداتیو، شرایط را برای تجمع فنل‌ها و فعالیت آنزیم‌های مرتبط فراهم می‌کند (Wang *et al.*, 2021). از طرف دیگر، نانو اکسید روی با افزایش دسترسی روی که یک عنصر کوفاکتور برای آنزیم‌های متعدد از جمله PAL است، موجب افزایش فعالیت آنزیمی و تولید فلاونوئیدها می‌شود (Costa *et al.*,

نتایج نشان داد که میزان فنل و فلاونوئید کل که از شاخص‌های مهم آنتی‌اکسیدانی و تأثیرگذار در کیفیت میوه هستند، در تمام تیمارهای آزمایشی نسبت به شاهد افزایش قابل توجهی داشتند. کوتینهو و همکاران (Coutinho *et al.*, 2020) در گوجه‌فرنگی گزارش کردند که کاربرد سیلیس منجر به افزایش میزان فنل کل می‌شود. همچنین مونارِتو و همکاران (Munaretto *et al.*, 2018) نیز گزارش کردند که کاربرد سیلیس منجر به افزایش میزان فنل در دو رقم توت‌فرنگی شد که با نتایج به‌دست آمده از مطالعه حاضر در یک راستا می‌باشد. نانو اکسید روی احتمالاً با افزایش

شاخص‌های رشدی و نمو میوه توت‌فرنگی رقم مونتری شدند، به‌طوری‌که اندازه میوه و شدت رنگ‌گیری آن به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. افزایش میزان مواد جامد محلول و کاهش اسیدیت قابل تیتراسیون در میوه‌های تیمار شده بیانگر بهبود شاخص طعم به‌عنوان یکی از عوامل مهم تاثیرگذار بر میزان بازارپسندی میوه توت‌فرنگی بود. ترکیبات فنلی و فلاونوئیدی همراه با آنتوسیانین که نقش مهمی در رنگ، طعم و کیفیت میوه توت‌فرنگی دارند با تیمار نانوآکسید روی (۱۰۰ میلی گرم در لیتر) یا نانوسیلیس (۱۵۰ میلی گرم در لیتر) همراه با ال-آرژینین در غلظت ۲۰۰ میلی گرم در لیتر به‌طور معنی‌داری افزایش یافتند؛ لذا ترکیبات مورد استفاده در این تحقیق به‌عنوان ترکیباتی سالم، برای بهبود خصوصیات کمی و کیفی میوه توت‌فرنگی رقم مونتری و بهبود ارزش تغذیه‌ای آن قابل توصیه می‌باشند

(2023). همچنین ال-آرژینین از طریق افزایش تولید نیتریک‌اکسید و تنظیم بیان ژن‌های مسیر فنل پروپانوئید، باعث تحریک بیشتری در سنتز فلاونوئیدها شده است (Neill *et al.*, 2008). آنتوسیانین‌ها رنگدانه‌هایی محلول در آب از خانوادهٔ فلاونوئیدها هستند که به میوه رنگ قرمز، بنفش یا آبی می‌دهند. این ترکیبات به‌عنوان آنتیاکسیدانهای قوی عمل میکنند و با افزایش مقاومت به تنش، پیری سلولی، UV و پاتوژنها، ارزش تغذیه‌ای و دارویی میوه را بالا می‌برند؛ همچنین شاخصی مهم در رسیدگی، طعم و بازارپسندی توت‌فرنگی به شمار می‌روند (Martínez-Ferri *et al.*, 2023). ال-آرژینین به عنوان پیش‌ماده نیتریک‌اکسید موجب فعال شدن آنزیم‌هایی مانند فنیل‌آلانین آمونیالایز (PAL)، دی‌هیدروفلانون‌ردکتاز (DFR) و سایر آنزیم‌های مسیر بیوسنتزی آنتوسیانین می‌شود (Hao *et al.*, 2009). در مطالعه حاضر بیشترین اثر تحریک سنتز آنتوسیانین در غلظت ۲۰۰ میلی گرم در لیتر ال-آرژینین مشاهده شد و غلظت ۴۰۰ میلی گرم در لیتر ال-آرژینین تأثیر منفی در میزان آنتوسیانین میوه توت‌فرنگی داشت. این موضوع می‌تواند بیانگر این امر باشد که پاسخ گیاه به آرژینین به غلظت مورد استفاده بستگی دارد و غلظت‌های زیاد می‌توانند باعث بروز اثر بازدارنده یا تغییری در تعادل تنظیمی گردند (Winter *et al.*, 2015) در تأیید نتایج مطالعه حاضر واتگ و همکاران (Wang *et al.*, 2024) در ذغال‌اخته افزایش بیان ژن‌های مربوط به بیوسنتز آنتوسیانین و افزایش میزان آنتوسیانین را در میوه‌های تیمار شده با ال-آرژینین گزارش کردند، همچنین علی و همکاران (Ali *et al.*, 2022) در میوه گواوا، افزایش ۴۲/۳ درصدی آنتوسیانین را در اثر کاربرد ال-آرژینین گزارش کردند که نتایج به‌دست آمده از مطالعه حاضر نیز بیانگر همین موضوع می‌باشد.

### نتیجه‌گیری کلی

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که تیمارهای نانو اکسید روی و سیلیس به تنهایی یا در ترکیب با ال-آرژینین باعث بهبود

## References

- Abd-Elkader H.H., Massoud H.Y., El-Baz T.T., and El-Erian, M.A. 2020. Effect of amino acids spray on growth, flowering and keeping quality of *Gerbera jamesonii* L. as a pot plant. *Journal of Plant Production*, 11(2): 201-206.
- Abdel-Sattar M., Makhsha E., and Al-Obeed R.S. 2024. Conventional and nano-zinc foliar spray strategies to improve the physico-chemical properties and nutritional and antioxidant compounds of timor mango fruits under abiotic stress. *Horticulturae*, 10(10): 1096.
- Abdollahi F., Zarei A., Erfani Moghadam J., and Rostamini M. 2024. Foliar application of silica and potassium sulphate on some characteristics of pomegranate fruit cv. 'Malase-Saveh'. *Plant Production*, 47(2): 309-321. (In Persian).
- Abedy A. 2001. Effects of zinc sulfate and citric acid spray on fruit characteristics of tomato cultivar 'Urbana'. *Unpublished Master's Thesis, Shiraz University, Shiraz, Iran*.
- Ahmad R., Muhammad H.M.D., Naz S., Tiwari R.K., Lal M.K., Ahmad P., and Altaf, M.A. 2024. From stress to success: silicon and nano-silicon strategies for enhancing fruit yield and quality in cadmium-exposed trees. *South African Journal of Botany*, 167: 441-447.
- Akanbi-Gada M.A., Ogunkunle C.O., Vishwakarma V., Viswanathan K., and Fatoba P.O. 2019. Phytotoxicity of nano-zinc oxide to tomato plant (*Solanum lycopersicum* L.): Zn uptake, stress enzymes response and influence on non-enzymatic antioxidants in fruits. *Environmental Technology and Innovation*, 14: 100325.
- Alcázar R., Marco F., Cuevas J.C., Patron M., Ferrando A., Carrasco P., and Tiburcio A.F. 2010. Involvement of polyamines in plant response to abiotic stress. *Biotechnology Letters*, 32(4): 583-592.
- Alhousari F., and Greger M. 2018. Silicon and mechanisms of plant resistance to insect pests. *Plants*, 7(2): 33.
- Ali M.H., Khan, A.S., Jaskani M.J., Anwar R., Ali S., Malik A.U., and Ayyub S. 2022. Pre-storage application of L-arginine mitigates chilling injury and maintains quality of *Sandhuri guava* fruit. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(3): e16405.
- Ali M.N., and Serce S. 2022. Vitamin C and fruit quality consensus in breeding elite European strawberry under multiple interactions of environment. *Molecular Biology Reports*, 49(12): 11573-11586.
- Ali N., Réthoré E., Yvin J.C., and Hosseini S.A. 2020. The regulatory role of silicon in mitigating plant nutritional stresses. *Plants*, 9(12): 1779.
- Ali R., Bashir Z., Fayaz U., and Nisa, M., 2025. Silicate Solubilizers: Role of Silicate Solubilizing Microorganisms in Organic Agriculture. In *Organic Farming*, CRC Press, pp. 141-168.
- ALnaass N.S., Agil H.K., and Ibrahim H.K. 2021. Use of fertilizers or importance of fertilizers in agriculture. *International Journal of Advanced Academic Studies*, 3(2): 52-57.
- Ayala-Zavala J.F., Wang S.H.Y., Wang C.Y., and Gonzalez-Aguilar G.A. 2007. High oxygen treatment increases antioxidant capacity and postharvest life of strawberry fruit. *Food Technology and Biotechnology*, 425:166-173.
- Bidaki S., Tehranifar A., and Khorasani R. 2017. Improving the post-harvest viability of two strawberry cultivars (*Fragaria × ananassa* Duch) using amino acids in a soilless cultivation system. *Science and Technology of Greenhouse Crops*, 2(9): 1-9. (In Persian).
- Bowler C., Van Camp W., Van Montagu M., and Inze D. 1994. Superoxidedismutase in plants. *Critical Reviews in Plant Science*, 13 (3): 199-218.
- Chen H., Cao S., Fang X., Mu H., Yang H., Wang X., and Gao H. 2015. Changes in fruit firmness, cell wall composition and cell wall degrading enzymes in postharvest blueberries during storage. *Scientia Horticulturae*, 188: 44-48.
- Chen Q., Wang Y., Zhang Z., Liu X., Li C., and Ma F. 2022. Arginine increases tolerance to nitrogen deficiency in *Malus hupehensis* via alterations in photosynthetic capacity and amino acids metabolism. *Frontiers in Plant Science*, 12: 772086.
- Costa M.I., Sarmiento-Ribeiro A.B., and Gonçalves A.C. 2023. Zinc: from biological functions to therapeutic potential. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(5): 4822.
- Coutinho P.W.R., de Moraes Echer M., Braga G.C., Guimarães V.F., do Carmo Lana M., Alves T.N., and Brito T.S. 2020. Effect of pre-harvest calcium silicate on post-harvest quality of tomatoes. *Research, Society and Development*, 9(11): e74791110148.
- Cui H.C., Sun Q., Liu J., and Gu W. 2006. Applications of Nanotechnology in Agrochemical Formulation. *Perspectiv, Challenges and Strategies*, Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agriculture Sciences, Beijing, China, pp. 1-6.

- Du G., Li M., Ma F., and Liang, D. 2009. Antioxidant capacity and the relationship with polyphenol and vitamin C in *Actinidia* fruits. *Food Chemistry*, 113(2): 557-562.
- Elam E., Lv Y.M., Wang W., Thakur K., Ma W.P., Ni Z.J., and Wei Z. J. 2022. Effects of nitric oxide on postharvest storage quality of *Lycium barbarum* fruit. *Food Science and Technology*, 42: e84122.
- El-Beltagi H. S., Ullah I., Sajid M., Basit A., Shehata W.F., ALTURKI S.M., and Ali F. 2022. Influence of maturity stages on postharvest physico-chemical properties of grapefruit (*Citrus paradisi* var. 'Shamber Tarnab') under different storage durations. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 50(1): 12620-12620.
- El-Hak R.E.S.A., El-Said S.A.E.A., El-Shazly A.A.E.F., El-Gazzar M., Shaaban E.A.E.A., and Saleh M.M.S. 2019. Efficiency of nano-zinc foliar spray on growth, yield and fruit quality of Flame seedless grape. *Journal of Applied Sciences*, 19(6): 612-617
- El-Henawy A., El-Sheikh I., Hassan A., Madein A., El-Sheikh A., El-Yamany A., and Faizy S. E. D. 2018. Response of cultivated broccoli and red cabbage crops to mineral, organic and nano-fertilizers. *Environment, Biodiversity and Soil Security*, 2(2018): 221-231.
- El-Naggar A.A.M., Adam A.I., and El-Tony, F.E.Z.H. 2013. Response of Longiflorum X Asiatic Hybrid Liliun plants to foliar spray with some amino acids. *Journal of Agricultural Research*, 58(3): 197-208.
- Elsabagh A.M.S., Ali M.M., Haikal A.M., and Abdelhady A.H. 2020. Effect of some pre-harvest treatments on quality of fruit of Amal apricot cultivar. *New York Science Journal*, 13: 16-24.
- Fauteux F., Rémus-Borel W., Menzies J.G., and Bélanger, R.R., 2005. Silicon and plant disease resistance against pathogenic fungi. *FEMS Microbiology Letters*, 249(1): 1-6.
- Fenech M., Amaya I., Valpuesta V., and Botella M.A. 2019. Vitamin C content in fruits: Biosynthesis and regulation. *Frontiers in Plant Science*, 9: 2006.
- Geremew A., Carson L., Woldeesenbet S., Wang H., Reeves S., Brooks Jr N., and Peace, E. 2023. Effect of zinc oxide nanoparticles synthesized from *Carya illinoensis* leaf extract on growth and antioxidant properties of mustard (*Brassica juncea*). *Frontiers in Plant Science*, 14: 1108186.
- Ghorbanpour M., Mohammadi H., and Kariman K. 2020. Nanosilicon-based recovery of barley (*Hordeum vulgare*) plants subjected to drought stress. *Environmental Science: Nano*, 7(2): 443-461.
- Hao G., Du X., Zhao F., Shi R., and Wang J. 2009. Role of nitric oxide in UV-B-induced activation of PAL and stimulation of flavonoid biosynthesis in *Ginkgo biloba* callus. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 97(2): 175-185.
- Hasan M. U., Rehman R.N.U., Malik A. U., Haider M. W., Ahmed Z., Khan A.S., and Anwar, R. 2019. Pre-storage application of L-arginine alleviates chilling injury and maintains postharvest quality of cucumber (*Cucumis sativus*). *International Journal of Horticultural Science and Technology*, 2: 102-108.
- Hasanuzzaman M., Bhuyan M. B., Anee T.I., Parvin K., Nahar K., Mahmud J.A., and Fujita M. 2019. Regulation of ascorbate-glutathione pathway in mitigating oxidative damage in plants under abiotic stress. *Antioxidants*, 8(9): 384.
- Hosseini Molla S.M., Rastegar S., Ghasemi V., and Khademi O. 2023. Alleviating chilling injury, decay and extending the shelf life of pomegranate fruit cv. 'Malase-e-saveh' by L-arginine treatment. *Pomology Research*, 7(2): 104-118. (In Persian).
- Kamiab F., Tavassolian I., and Hosseini Farahi, M. 2020. Biologia futura: the role of polyamine in plant science. *Biologia Futura*, 71(3): 183-194.
- Khan M. A., Azam M., Ahmad S., and Atiq M. 2023. Improvement of physicochemicals, antioxidant system and softening enzymes by postharvest L-arginine application leads to maintain persimmon fruit quality under low temperature storage. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 17(3): 2964-2977.
- Li Y., Hu H., Wang R., Yin J., Zhu Y., and Chen L. 2025. Silica nanoparticles promote the growth of pepper under salt stress by improving photosynthesis and modulating the water relationship. *Scientia Horticulturae*, 350: 114295.
- Liang Y., Sun W., Zhu Y.G., and Christie P. 2007. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: a review. *Environmental Pollution*, 147(2): 422-428.
- Liang Y.C., Sun, W.C., Si, J., and Römhelt, V. 2005. Effects of foliar-and root-applied silicon on the enhancement of induced resistance to powdery mildew in *Cucumis sativus*. *Plant Pathology*, 54(5): 678-685.
- Liu L., Wang X., Gao Z., Zhan Y., Yao M., and Bao J. 2025. Carbonic anhydrase immobilized by ZnO nanoparticles for catalytic CO<sub>2</sub> conversion. *Water, Air, and Soil Pollution*, 236(4): 1-13.
- Luyckx M., Hausman J.F., Blanquet M., Guerriero G., and Lutts S. 2021. Silicon reduces cadmium absorption and increases root-to-shoot translocation without impacting growth in young plants of hemp (*Cannabis sativa* L.) on a short-term basis. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(28): 37963-37977.

- Mahdavi S., Karimi R., and Valipouri Goudarzi A. 2022. Effect of nano zinc oxide, nano zinc chelate and zinc sulfate on vineyard soil Zn-availability and grapevines (*Vitis vinifera* L.) yield and quality. *Journal of Plant Nutrition*, 45(13): 1961-1976.
- Majedi M. 1994. Chemical Test Procedures of Food Material. Jahad Daneshgahi, University of Tehran, 65p.
- Maklad T.N., El-Sawwah O.A.O., and Nassar S.A. 2020. Effect of calcium, zinc and boron treatments on flowering, yield and fruit quality of mango Ewais cultivar. *Journal of Plant Production*, 11(12): 1463-1468.
- Martínez-Ferri E., Forbes-Hernandez T. Y., Cervantes L., Soria C., Battino M., and Ariza, M.T. 2023. Relation between strawberry fruit redness and bioactivity: Deciphering the role of anthocyanins as health promoting compounds. *Foods*, 13(1): 110.
- Maslahati fard S., and Hassanpoor H. 2023. The effect of arginine on some biochemical attributes strawberry fruit (*Fragaria* × *ananassa* cv. Albion) under deficit fustigation. *Journal of Horticultural Science*, 37(1): 135-149. (In Persian).
- Mohebbi H., Ebadi A., Taheri M., Zarabi M., and Bihamta M.R. 2022. The effect of different levels of foliar application of zinc, iron, and manganese micronutrients on reproductive characteristics and yield of *Vitis vinifera* grapes in some vineyards of Zanjan province. *Journal of Horticultural Science*, 36(2): 443-457. (In Persian).
- Munaretto L.M., Botelho R.V., Resende J.T.V., Schwarz K., and Sato A.J. 2018. Productivity and quality of organic strawberries pre-harvest treated with silicon. *Horticultura Brasileira*, 36: 40-46.
- Mushtaq N., Altaf M. A., Ning J., Shu H., Fu H., Lu X., ... and Wang Z. 2024. Silicon improves the drought tolerance in pepper plants through the induction of secondary metabolites, GA biosynthesis pathway, and suppression of chlorophyll degradation. *Plant Physiology and Biochemistry*, 214: 108919.
- Neill S.J., Desikan R., Clarke A., Hurst R.D., and Hancock, J.T. 2008. Nitric oxide is a novel component of abscisic acid signaling in stomatal guard cells. *Plant Physiology*, 128(1): 13-16.
- Nilprapruk P. 2020. Exogenous arginine treatment for inhibiting browning symptom and improving the quality of fresh-cut red cabbage. *Asia-Pacific Journal of Science and Technology*, 25(02):1-10.
- Pakkish Z., and Mohammadrezakhani, S. 2022. The effect of preharvest application of arginine on the postharvest quality of sweet cherry fruits during storage. *International Journal of Fruit Science*, 22(1): 837-851.
- Penuelas J., Coello F., and Sardans J. 2023. A better use of fertilizers is needed for global food security and environmental sustainability. *Agriculture and Food Security*, 12(1): 1-9.
- Rastogi A., Zivcak M., Sytar O., Kalaji H. M., He X., Mbarki S., and Brestic, M. 2017. Impact of metal and metal oxide nanoparticles on plant: a critical review. *Frontiers in Chemistry*, 5:78.
- Reddy T.Y., and Reddi G.H.S. 1998. Principles of Agronomy. Kalyani Publishers Ludhiana, New Delhi, India, 515p.
- Rodríguez-Ruiz M., Mateos R.M., Codesido V., Corpas F.J., and Palma J.M. 2017. Characterization of the galactono-1, 4-lactone dehydrogenase from pepper fruits and its modulation in the ascorbate biosynthesis. Role of nitric oxide. *Redox Biology*, 12: 171-181.
- Saavedra T., Gama F., Rodrigues M.A., Abadía J., de Varennes A., Pestana M., Da Silva J.P., and Correia, P.J. 2022. Effects of foliar application of organic acids on strawberry plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 188: 12-20.
- Saini S., Kumar P., Sharma N.C., Sharma N., and Balachandar D. 2021. Nano-enabled Zn fertilization against conventional Zn analogues in strawberry (*Fragaria* × *ananassa* Duch.). *Scientia Horticulturae*, 282: 110016.
- Sanches A.G., and Feitosa E.M.F. 2025. Postharvest arginine spraying delayed ripening during storage of papaya. *Journal of Horticulture and Postharvest Research*, 8(2):139-150.
- Seleiman M.F., Al-Selwey W.A., Ibrahim A.A., Shady M., and Alsadon A.A. 2023. Foliar applications of ZnO and SiO<sub>2</sub> nanoparticles mitigate water deficit and enhance potato yield and quality traits. *Agronomy*, 13(2): 466.
- Shin S.W., Ghimeray A.K., and Park, C.H. 2014. Investigation of total phenolic, total flavonoid, antioxidant and allyl isothiocyanate content in the different organs of wasabi Japonica grown in an organic system. *African Journal of Traditional, Complementary and Alternative Medicines*, 3(11): 38-45.
- Shu P., Min D., Ai W., Li J., Zhou J., Li Z., ... and Guo, Y. 2020. L-Arginine treatment attenuates postharvest decay and maintains quality of strawberry fruit by promoting nitric oxide synthase pathway. *Postharvest Biology and Technology*, 168: 111253.
- Srivastava P.C., and Gupta U.C. 1996. Trace Elements in Crop Production. Science Pub. Inc. Lebanon, N.H. 03766 USA, 365p.

- Vafaei Moghadam A., Iranbakhsh A.R., Saadatmand S., Ebadi M., and Ardebili, Z. 2021. New insights into the transcriptional, epigenetic, and physiological responses to zinc oxide nanoparticles in *Datura stramonium*; potential species for phytoremediation. *Journal of Plant Growth Regulation*, 41(1), 271-281.
- Vargas M., Albors A., Chiralt A., and Gonzalez-Martinez, C. 2006. Quality of cold-stored strawberries as affected by chitosan-oleic acid edible coatings. *Postharvest Biology and Technology*, 41: 164-71.
- Wang D., Hou L., Zhang L., and Liu, P. 2021. The mechanisms of silicon on maintaining water balance under water deficit stress. *Physiologia Plantarum*, 173(3): 1253-1262.
- Wang J., Zhao R., Li Y., Rong H., Yang L., Gao M., and Yan X. 2024. Effect and Mechanism of L-Arginine against alternaria fruit rot in postharvest blueberry fruit. *Plants*, 13(8): 1058.
- Wang T., Liu Q., Wang N., Dai J., Lu Q., Jia X., and Zuo, Y. 2021. Foliar arginine application improves tomato plant growth, yield, and fruit quality via nitrogen accumulation. *Plant Growth Regulation*, 95: 421-428.
- Winter G., Todd C.D., Trovato M., Forlani G., and Funck D. 2015. Physiological implications of arginine metabolism in plants. *Frontiers in Plant Science*, 6: 534.
- Wrolstad R. E. 1976. Color and pigment analysis in fruit products. Station Bull. 621. Agricultural Experiment station, Oregon State University, Corvallis, OR, USA.
- Xiao J., Li Y., and Jeong B.R. 2022. Foliar silicon spray to strawberry plants during summer cutting propagation enhances resistance of transplants to high temperature stresses. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6: 938128.
- Ye M., Song Y.Y., Long J., Wang R., Baeron S.R., Pan Z., Zhu-Salzman K., Xie J., Cai K., Luo S., and Zeng R. (2013). Priming of jasmonate-mediated antiherbivore defense responses in rice by silicon. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110 (38): 3631-3639.
- Yu W., Ma P., Sheng J., and Shen L. 2024. Arginine and cysteine delay postharvest ripening of tomato fruit by regulating ethylene production. *Postharvest Biology and Technology*, 216: 113052.