مجله علوم و فنون باغبانی ایران جلد ۲۷ شماره ۲ صفحه‌های ۱۵۷ تا ۱۷۴ (۱۴۰۵) (نسخه پیش انتشار)

مقاله پژوهشی

تأثیر کاربرد سلنیوم و ید بر رشد، عملکرد و ویژگی‌های کیفی میوه توت‌فرنگی (*Fragaria × ananassa*) در شرایط تنش شوری در کشت هیدروپونیک

The Effect of Selenium and Iodine Application on Growth, Yield, and Quality Characteristics of Strawberry (*Fragaria × ananassa*) Fruit under Salinity Stress in Hydroponic Cultivation

سعید عشقی [۱]، سارا جمشیدی [۱]، سحر میرزایی [۲]، محسن شیردل [۱*]

۱. بخش علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۲. پژوهشکده گلخانه و محیط های کنترل شده، موسسه تحقیقات علوم باغبانی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

نویسنده مسئول: پست الکترونیک: (mohsenshirdel89@shirazu.ac.ir; mohsenshirdel89@gmail.com)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۳/۲۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۶/۳

چکیده

شوری یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده تولید محصولات باغبانی، به ویژه در سیستم‌های کشت هیدروپونیک محسوب می‌شود. این پژوهش با هدف بررسی اثر سلنیوم و ید بر کاهش خسارت‌های ناشی از تنش شوری در گیاه توت‌فرنگی رقم کردستان انجام شد. بنابراین پژوهش حاضر به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو سطح شوری (بدون شوری و ۴۰ میلی‌مولار NaCl) و تیمار کودی در چهار سطح شامل شاهد، سلنیوم (یک میلی‌گرم در لیتر در محلول‌غذایی) و ید (یک میکرومولار به صورت محلول‌پاشی) و کاربرد ترکیبی سلنیوم و ید با چهار تکرار در دانشگاه شیراز انجام شد. نتایج نشان داد که تنش شوری باعث کاهش ویژگی‌های رشدی، عملکردی و کیفی میوه شد، اما استفاده از سلنیوم و ید باعث بهبود این صفات شد. کاربرد همزمان سلنیوم و ید در شرایط تنش شوری به‌ترتیب باعث افزایش ۲۸ و ۱۴ درصدی وزن تر شاخساره (۳۴/۳۷ گرم) و وزن خشک شاخساره (۹/۸۷ گرم) نسبت به شاهد شد. افزون بر این کاربرد همزمان سلنیوم و ید باعث افزایش وزن میوه‌های اول (۷/۳۰ گرم) و دوم (۶/۵۰ گرم) و عملکرد (۳۶ گرم) توت‌فرنگی در شرایط تنش شد که این افزایش به ترتیب ۴۶، ۷۱ و ۳۹ درصد نسبت به عدم کاربرد درهمان شرایط بود. کاربرد همزمان سلنیوم و ید مواد جامد محلول (۸/۸۲ درصد)، اسیدیته قابل تیتراسیون (۱/۰۶ درصد)، ویتامین C (۹۹/۵ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم وزن تازه)، فنول کل (۵/۷۶ میلی‌گرم گالیک اسید در گرم) و آنتوسیانین (۹۲/۲۳ میلی‌گرم سیانیدین-۳-گلوکوزید در ۱۰۰ گرم) را به ترتیب ۱۳، ۵۳، ۲۷، ۹ و ۴۱ در تنش شوری نسبت به عدم کاربرد افزایش داد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که کاربرد همزمان سلنیوم و ید می‌تواند به عنوان راهکاری مناسب برای افزایش تحمل به شوری و افزایش بهبود صفات رشد، عملکرد و کیفی میوه توت‌فرنگی در سیستم‌های کشت هیدروپونیک مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: تنش غیرزیستی، فنول کل، کشت بدون خاک، مواد جامد محلول، میوه‌های اولیه و ثانویه، وزن تر

مقدمه

توت‌فرنگی با نام علمی *Fragaria × ananassa* Duch. یکی از مهمترین محصولات باغبانی می‌باشد و منبع خوبی از فیبر، ویتامین‌ها، پتاسیم، کلسیم، آهن، فسفر و آنتی‌اکسیدان‌ها است که به دلیل عطر و طعم خاص و خواص سلامتی بخش، جایگاه

خود را در رژیم غذایی میلیون‌ها نفر در جهان پیدا کرده است (Yang *et al.,* 2026). افزون بر ارزش غذایی، توت‌فرنگی از ارزش اقتصادی بالایی نیز برخودار است و در بسیاری از کشورهای جهان به صورت مزرعه‌ای و گلخانه‌ای کشت وکار می‌شود. ایران نیز با سطح زیر کشت بیش از ۴۴۰۰ هکتار و تولید بیش از ۶۵ هزار تن در سال از بزرگترین تولید کنندگان توت‌فرنگی در خاورمیانه می‌باشد (FAO, 2024). با توجه به نیاز روزافزون بازار و حساسیت توت‌فرنگی به تنش شوری کشت‌های بدون خاک آن رو به گسترش است.

تنش شوری یکی از مهمترین تنش‌های غیرزیستی است که رشد و عملکرد محصولات کشاورزی در سراسر جهان با مشکل مواجه کرده است (Khamsezadeh Qazvini *et al.,* 2025) و به دلیل کاهش کیفیت منابع آب آبیاری، تغییر اقلیم و مدیریت نامناسب اراضی به شدت درحال گسترش است، به طوری که سالانه ۱/۵ میلیون هکتار به زمین‌های شور غیرقابل کشت افزوده می‌شود (Hasanuzzaman *et al*., 2022). تنش شوری در توت‌فرنگی جذب آب توسط ریشه‌ها را محدود می‌کند و تجمع سمی یون‌های سدیم و کلر در قسمت‌های هوایی گیاه باعث کاهش رسانایی روزنه و در نتیجه کاهش فتوسنتز، اختلال عملکرد غشاء و استرس اکسیداتیو می‌شود (Yadav *et al.,* 2026). افزون بر این، شوری ترکیب شیمیایی میوه‌ها را تغییر می‌دهد و بر ویژگی‌های مربوط به پذیرش و فرآوری توسط مصرف‌کنندگان از جمله مواد جامد محلول (TSS)، اسیدیته قابل تیتراسیون (TA)، غلظت ترکیبات زیست فعال مانند اسید آسکوربیک و پلی‌فنول‌ها تأثیر می‌گذارد (Yaghubi *et al.,* 2019). یکی از روش‌های مقابله با تنش شوری، شناخت روش‌هایی است که اثر این تنش را کاهش دهند و تا حد امکان از افت عملکرد گیاهان جلوگیری کنند (Ondrasek *et al.,* 2022).

در سال‌های اخیر راهکارهای مختلفی برای کاهش اثرات نامطلوب تنش شوری در گیاه توت‌فرنگی مورد بررسی قرار گرفته است. کاربرد ترکیبات تنظیم‌کننده رشد و عناصر غذایی به‌صورت محلول‌پاشی یا از طریق ریشه می‌تواند با تقویت سازوکارهای دفاعی گیاه، بخشی از خسارت ناشی از شوری را کاهش دهد. گزارش شده است که اسید سالیسیلیک، به‌ویژه در غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر روی توت‌فرنگی تحت تنش شوری، باعث بهبود سطح برگ، وزن تر و خشک ریشه و شاخساره و عملکرد شد (Eshghi *et al.,* 2016). همچنین محلول‌پاشی ملاتونین در توت‌فرنگی تحت تنش شوری ۴۰ و ۸۰ میلی‌مولار NaCl، کاهش عملکرد و کیفیت میوه ناشی از شوری را کاهش داد؛ به‌طوری‌که ملاتونین ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرومولار باعث حفظ برخی صفات کیفی میوه شامل مواد جامد محلول، اسیدیته کل، اسید آسکوربیک، ترکیبات فنولی و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی شد (Zahedi *et al.,* 2020). این مطالعات نشان می‌دهند که کاربرد تنظیم‌کننده‌های رشد و عناصر غذایی می‌تواند از طریق حفظ رشد رویشی، زیست‌توده ریشه و شاخساره، عملکرد و برخی ترکیبات کیفی میوه، تحمل توت‌فرنگی به شوری را افزایش دهد. در این میان، سلنیوم نیز به‌عنوان یکی از عناصر مفید توانسته اثرات مثبتی بر رشد و عملکرد گیاهان مختلف در شرایط تنش نشان دهد (Zahedi *et al.,* 2019; Chen *et al.,* 2025; Heydari *et al.,* 2026).

سلنیوم (Se) به عنوان یکی از عناصر مفید برای گیاهان شناخته می‌شود که در غلظت‌های پایین می‌تواند رشد و عملکرد گیاه را بهبود بخشد، به ویژه هنگامی که گیاه در معرض تنش‌های محیطی قرار دارد. یافته‌ها نشان داده‌اند که کاربرد Se از طریق افزایش ظرفیت سیستم پاداکساینده، کاهش تجمع گونه‌های فعال اکسیژن و حفظ پایداری غشاهای سلولی، موجب کاهش آسیب‌های ناشی از تنش شوری می‌شود (Pourebrahimi *et al.,* 2023). کاربرد ریشه‌ای Se در برنج (*Oryza sativa* L.) موجب افزایش نرخ فتوسنتز و تجمع زیست‌توده و بهبود تحمل به تنش شد (Yin *et al.,* 2019). همچنین کاربرد Se و نانو Se موجب افزایش پارامترهای رشد، رنگیزه‌های فتوسنتزی و محتوای نسبی آب گیاه تحت شوری در شاهی‌لیمو (*Aloysia citrodora*) شد (Ghanbari *et al.,* 2023). همچنین در گیاه ماش (*Vigna mungo*)، کاربرد Se تحت تنش شوری موجب بهبود رنگیزه‌های فتوسنتزی و دفاع آنتی‌اکسیدانی شد (Abidin *et al.,* 2025). علاوه بر این، گزارش شده است که محلول‌پاشی Se موجب افزایش سفتی میوه، اسیدیته قابل تیتراسیون، مواد جامد محلول و بهبود فعالیت آنتی‌اکسیدانی و قابلیت انبارمانی میوه در سیب رقم‘Starking Delicious’ شد (Babalar *et al.,* 2019). در گوجه‌فرنگی نیز محلول‌پاشی کود حاوی Se موجب افزایش ترکیبات فنولی، ویتامین C، فعالیت آنتی‌اکسیدانی و برخی شاخص‌های کیفیت میوه و افزایش ماندگاری شد (Morais *et al.,* 2024).

ید (I) به عنوان یکی از عناصر مفید برای گیاهان شناخته می‌شود که اگرچه ضروری بودن آن برای رشد گیاهان به اثبات نرسیده است، اما در غلظت‌های مناسب می‌تواند اثرات مثبتی بر رشد، ویژگی‌های فیزیولوژیک و تحمل گیاهان به تنش‌های محیطی داشته باشد. کاربرد خارجی ید در گیاهان با اثرات مفیدی مانند افزایش رشد، افزایش بیوسنتز آنتی‌اکسیدان‌ها و افزایش تحمل به تنش‌ها همراه بوده است (Gonzali *et al*., 2017). در گیاه گوجه‌فرنگی، کاربرد ید تحت تنش شوری موجب افزایش عملکرد میوه و تحمل به شوری شد و با بهبود وضعیت تغذیه‌ای و برخی پاسخ‌های فیزیولوژیک همراه بود (Kiferle *et al.*, 2022). همچنین کاربرد نانوذرات ید و یدید پتاسیم موجب افزایش زیست‌توده و عملکرد و بهبود جذب و استفاده از نیتروژن در کاهو شد (Patino-Cruz *et al.*, 2025). کاربرد ید همراه با زیست‌محرک عصاره جلبک دریایی موجب بهبود عملکرد، برخی ویژگی‌های کیفی و صفات عملکردی میوه، از جمله افزایش ترکیبات زیست‌فعال و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی در میوه توت‌فرنگی شد (Consentino *et al.*, 2023).

اگرچه در سال‌های اخیر پژوهش‌های متعددی درباره نقش سلنیوم و ید در افزایش تحمل گیاهان به تنش‌های محیطی انجام شده است، اما اطلاعات مربوط به اثر این عناصر در گیاه توت‌فرنگی، به‌ویژه تحت شرایط تنش شوری، همچنان محدود است. بیشتر تحقیق‌های پیشین اثر سلنیوم یا ید را به‌صورت جداگانه و عمدتاً در سایر محصولات زراعی و باغبانی بررسی کرده‌اند و پژوهش‌های اندکی به ارزیابی اثر این عناصر بر رشد، عملکرد و ویژگی‌های کیفی میوه توت‌فرنگی در شرایط شوری پرداخته‌اند. همچنین، مقایسه کارآیی سلنیوم و ید در کاهش اثرات نامطلوب شوری و بهبود پاسخ‌های رشدی، فیزیولوژیک و کیفی این گیاه کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این‌رو، بررسی اثر این دو عنصر مفید بر عملکرد و کیفیت میوه توت‌فرنگی در شرایط تنش شوری می‌تواند اطلاعات ارزشمندی برای بهبود تولید این محصول در شرایط محدودیت کیفیت آب آبیاری فراهم کند.

مواد و روش‌ها

شرایط اقلیمی و موقعیت محل

این پژوهش به‌منظور بررسی اثر سلنیوم و ید بر رشد، عملکرد و ویژگی‌های کیفی میوه در شرایط تنش شوری در گلخانه بخش علوم باغبانی دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز واقع در منطقه باجگاه (۱۵ کیلومتری شمال شرقی شیراز، عرض جغرافیایی ۳۸ درجه و ۲۹ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۳۵ درجه و ۵۲ دقیقه شرقی و با ارتفاع ۱۸۱۰ متر از سطح دریا) در شهریورماه سال ۱۴۰۰ انجام شد. میانگین دمای گلخانه در روز (۳±۲۲ °C) و دمای شب (۳±۱۶ °C) بود و درصد رطوبت نسبی ۵±۵۵ بود و شدت نور بیش از ۸۰۰ میکرومول بر مترمربع بر ثانیه در طی دوره ۱۱۰ روزه آزمایش بود.

مواد گیاهی و عملیات کاشت

برای کاشت گیاهان، گلدان‌های پلاستیکی ۳ لیتری با بستر کشت کوکوپیت و پرلایت به نسبت ۱:۱ حجمی پرشدند. گیاهان دختری توت‌فرنگی رقم کردستان از مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی سنندج استان کردستان تهیه شد و گیاهان دختری با قارچکش بنومیل با غلظت ۱/۵ درهزار به مدت ۵ دقیقه به صورت غوطه‌وری ضدعفونی شدند (Paulus *et al.*, 1974). پس از ضدعفونی در هر گلدان یک گیاه دختری کشت شد. پس از کاشت گیاهان، یک هفته آبیاری انجام شد و در هفته دوم و سوم به ترتیب از محلول یک چهارم هوگلند (Hoagland & Arnon, 1950) و یک دوم هوگلند استفاده شد و پس از آن با محلول کامل هوگلند تغذیه انجام شد (Shirdel *et al.*, 2026). بعد از اینکه گیاهان حدود چهار تا پنج برگ سالم و کامل تولید کردند تیمارهای آزمایش آغاز شد. این پژوهش به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملا تصادفی انجام شد. فاکتور اول، شوری در دو سطح (۰ (شاهد) یا بدون تنش) و ۴۰ میلی‌مولار NaCl) و فاکتور دوم، تیمار کودی در چهار سطح شامل شاهد (۰)، سلنیوم یک میلی‌گرم در لیتر سلنات‌سدیم در محلول‌غذایی از طریق ریشه (Se) و ید یک میکرومولار از منبع پتاسیم یدات به صورت محلول‌پاشی (I) و تیمار ترکیبی سلنیوم+ید (سلنیوم یک میلی‌گرم در لیتر سلنات‌سدیم در محلول‌غذایی از طریق ریشه و ید یک میکرومولار پتاسیم یدات به صورت محلول‌پاشی (Se+I)) با چهار تکرار و هر تکرار با سه مشاهده (گلدان)، در مجموع ۹۶ گلدان انجام شد. از سه مشاهده در هر تکرار برای اهداف خاص استفاده شد، به طوری که

گلدان اول برای سنجش ویژگی‌های مورفولوژیک مثل سطح برگ و ویژگی‌های بیوشیمایی، گلدان دوم برای اندازه‌گیری وزن تر و خشک ریشه و اندام هوایی و سنجش عناصر غذایی و گلدان سوم برای اندازه‌گیری ویژگی‌های عملکردی و کیفی میوه استفاده شد. مشاهدات در نظر گرفته شده در هر تکرار در تجزیه و تحلیل و آماری به عنوان واحدهای مستقل در نظر گرفته نشدند. اعمال تیمار شوری ۴۰ میلی‌مولار به صورت تدریجی در مرحله ۵-۴ برگی انجام شد تا گیاه وارد شوک نشود، بدین صورت که ۲ مرحله شوری ۲۰ میلی‌مولار استفاده شد و پس از آن شوری ۴۰ میلی‌مولار اعمال شد. هدایت الکتریکی (EC) محلول غذایی هوگلند ۱/۹ دسی‌زیمنس بر متر (ds/m) بود و پس از اعمال شوری ۴۰ میلی‌مولار میزان EC به ds/m ۵/۸ رسید. pH محلول غذایی در طول دوره آزمایش دز محدوده ۶±۰/۲ بود. در این آزمایش تیمارهای سلنیوم با محلول‌غذایی هوگلند هر یک روز در میان اعمال شد و در رابطه با محلول‌پاشی ید هر هفته یک‌بار انجام شد. میزان محلول غذایی برای هر گلدان بسته به مرحله رشدی متفاوت بود به طوری که ۱۰ درصد از محلول ورودی به هر گلدان برای جلوگیری از تجمع نمک به صورت زه‌آب از ته گلدان خارج می‌شد.

اندازه‌گیری صفات مورفولوژیکی

سطح برگ

سه برگ به طور کامل توسعه یافته از هر تکرار به صورت تصادفی انتخاب و سطح برگ آن‌ها برحسب سانتی‌متر مربع، با دستگاه Leaf Area (Delta T Devices Ltd, Burwell and Cambridge، ساخت کشور انگلیس) اندازه‌گیری شد و سپس میانگین هر تکرار محاسبه شد.

وزن تر و خشک ریشه و شاخساره

در پایان آزمایش، گیاهان از گلدان خارج شده و ریشه‌های آن‌ها برای جداسازی محیط کشت به طور کامل شستشو شد. سپس قسمت ریشه از شاخساره از محل طوقه جدا شد و هر دو قسمت به صورت جداگانه وزن شد. سپس این دو قسمت به‌مدت ۴۸ ساعت در آون ۸۰ درجه سلسیوس قرار گرفت و وزن خشک آن‌ها اندازه‌گیری شد.

ویژگی‌های میوه و عملکرد توت‌فرنگی

وزن، طول، قطر و تعداد فندقه میوه‌های اول و دوم

در طول دوره آزمایش و پس از رسیدن میوه‌های اول و دوم، این میوه‌ها توزین شدند و میانگین میوه اولیه و دو میوه ثانویه به‌دست آمد. همچنین طول و قطر میوه‌های اول و دوم با استفاده از کولیس دیجیتال اندازه‌گیری شد و به عنوان میانگین طول و قطر میوه گزارش شد. افزون بر این تعداد فندقه‌های میوه اول و دو میوه دوم در هر بوته و هر تکرار شمارش شد و میانگین آن گزارش شد.

عملکرد تک بوته

در مدت ۶۰ روز به تدریج با رسیدن میوه‌ها، زمانی که حدود سه چهارم میوه قرمز شد برداشت آن‌ها صورت گرفته و وزن شدند. در پایان دوره آزمایش نیز تمام میوه‌های باقیمانده روی بوته جمع آوری شده و وزن شدند. سپس وزن تمامی میوه‌ها از آغاز تا پایان آزمایش باهم جمع شدند و به عنوان عملکرد میوه در هر بوته در این مدت در نظر گرفته شد.

اندازه‌گیری صفات کیفی میوه

مواد جامد محلول (TSS)

برای سنجش TSS یک قطره آب میوه بر روی قندسنج دیجیتال (Milwaukee، مدل MA871، ساخت کشور رومانی) قرار گرفت و میزان TSS بر حسب درصد بیان شد.

اسیدهای قابل تیتراسیون میوه (TA)

برای تعیین اسید کل دو قطره فنول فتالئین به ۵ میلی‌لیتر آب میوه افزوده شد و تا رسیدن به pH ، ۸/۲ با سود ۰/۱ نرمال تیتر شد. حجم سود مصرفی یادداشت شد و برای محاسبه میزان اسید کل از فرمول زیر (رابطه ۱) استفاده شد

(Ghasemnezhad *et al*., 2011). در این فرمول N نشان‌دهنده نرمالیه سود، V1 حجم سود مصرفی، V2 حجم نمونه و M.W. نیز وزن مولکولی اسید غالب (۱۹۲/۱۲۴ g/mol اسید سیتریک) است.

$$\% \text{ Acid (wt/vol)} = (N \times V1 \times M.W.)/(V2 \times 1000)*100 \quad \text{(رابطه ۱)}$$

میزان آسکوربیک اسید (ویتامین C)

ویتامین C یا ال آسکوربات از ویتامین‌های محلول در آب است. میزان ویتامین C به روش (Bor *et al*., 2006) اندازه‌گیری شد. به این منظور ۱۰۰ میکرولیتر از آب میوه با ۱۰ میلی‌لیتر اسید متافسفریک ۱ درصد مخلوط شد و به سرعت به‌هم زده شد، سپس ۱۰۰۰ میکرولیتر از محلول حاصل را با ۹ میلی‌لیتر ۲و۶ دی کلرو ایندوفنول ۵۰ میکرو مولار اضافه شد و برای چند ثانیه با همزن انگشتی تکان داده شد. میزان جذب نمونه در طول موج ۵۱۵ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر مدل T60 UV visible اندازه‌گیری شد. برای محاسبه میزان ویتامین C نمونه‌ها، از منحنی استاندارد آسکوربیک اسید استفاده شد.

فنول کل

میزان فنول کل با روش فولین سیوکالتیو اندازه‌گیری شد. ۲۰ میکرولیتر آب میوه با ۱۸۰ میکرولیتر از محلول ۵۰ درصد فولین- سیوکالتیو و ۹۰۰ میکرولیتر سدیم کربنات ۲ درصد مخلوط شد. مخلوط به‌مدت ۹۰ دقیقه در دمای اتاق در تاریکی نگهداری شد. جذب مخلوط واکنش در طول موج ۷۵۰ نانومتر به وسیله دستگاه اسپکتروفتومتر مدل T60 UV Visible اندازه‌گیری شد (Ghasemnezhad *et al*., 2010). سپس منحنی استاندارد فنول با استفاده از غلظت‌های مختلف گالیک‌اسید رسم شد و میزان فنول نمونه‌ها به صورت میلی گرم گالیک اسید در گرم میوه گزارش شد.

آنتوسیانین میوه

برای اندازه‌گیری مقدار آنتوسیانین میوه در تیمارهای مختلف از روش اختلاف pH استفاده شد (Lee *et al*., 2001). ابتدا دو نمونه بافر با استفاده از محلول‌های کلرید پتاسیم pH=1 و 0.025 مولار و استات سدیم pH=4.5 و 0.4 مولار تهیه شد. میزان ۵۰ میکرولیتر از عصاره با ۲۰۰ میکرولیتر از بافرها به‌طور جداگانه مخلوط شد و سپس میزان جذب هر دو نمونه تهیه شده در طول موج‌های ۷۰۰ و ۵۱۰ نانومتر و با استفاده از دستگاه میکروپلیت ریدر (Epoch Microplate Spectrophtometer, BioTek Instrument, Inc., USA) اندازه‌گیری و میزان آنتوسیانین توسط طبق فرمول زیر (رابطه ۲) محاسبه شد و به صورت میلی‌گرم سیانیدین-۳-گلیکوزاید در ۱۰۰ میلی‌گرم آب میوه گزارش شد. در این فرمول ۴۴۹/۲ جرم مولکولی سیانیدین-۳-گلیکوزاید، ۲۶۹۰۰ جذب مولی آن در pH=1 و DF فاکتور رقیق‌سازی است.

$$\text{Total anthocyanin} = \frac{((A510-A700)pH1.0-(A510-A700)pH4.5)) \times 449.2 \times DF \times 1000}{29600} \quad \text{(رابطه ۲)}$$

واکاوی داده‌ها

این پژوهش به صورت آزمایش فاکتوریل دو عاملی در قالب طرح کاملا تصادفی با چهار تکرار انجام شد. کلیه داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار TIBCO Statistic ver. 14.0 واکاوی و مقایسه میانگین داده‌ها توسط آزمون حداقل تفاوت معنی‌داری (LSD) در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. رسم نمودارها با استفاده از Excel 2021 انجام شد.

نتایج

وزن تر و خشک شاخساره

باتوجه به نتایج برهمکنش تنش شوری و تیمار کودی (A×B) بر وزن تر و خشک شاخساره هر دو در سطح احتمال یک درصد ($P<0.01$) معنی‌دار بود (جدول ۱). در زمان استفاده از تیمار عناصر ید و سلنیوم بدون تنش شوری، وزن تر و خشک شاخساره، نسبت به شاهد (۰) افزایش یافت. کاربرد تیمار ترکیبی Se+I به ترتیب باعث افزایش ۲۹ و ۲۱ درصدی وزن تر و

خشک شاخساره نسبت به شاهد در زمان بدون تنش شد (شکل‌های ۱-A و ۱-B). همچنین در تنش شوری، کاربرد تیمار ترکیبی Se+I به ترتیب باعث افزایش ۲۸ و ۱۴ درصدی وزن تر و خشک شاخساره نسبت به شاهد شد (شکل‌های ۱-A و ۱-B).

وزن تر و خشک ریشه

باتوجه به نتایج جدول تجزیه واریانس برهمکنش تنش شوری و تیمار کودی (A×B) بر وزن تر و خشک ریشه به‌ترتیب در سطح احتمال یک درصد (P<0.01) و پنج درصد (P<0.05) معنی‌دار بود (جدول ۱). در شرایط بدون تنش، کاربرد تیمار ترکیبی Se+I به ترتیب باعث افزایش ۶۶ و ۶۳ درصدی وزن تر و خشک ریشه بوته‌های توت‌فرنگی شد (شکل‌های ۱-C و ۱-D). همچنین در زمان اعمال تنش شوری، کاربرد تیمار Se+I به ترتیب باعث افزایش ۵۳ و ۱۲ درصدی وزن تر و وزن خشک ریشه نسبت به شاهد شد (شکل‌های ۱-C و ۱-D). نکته قابل توجه در شرایط تنش شوری، استفاده از تیمارهای ید و سلنیوم و ترکیب این دو عنصر باعث افزایش وزن خشک ریشه شد اما تفاوت معنی‌داری بین تیمارها و شاهد در همان شرایط وجود نداشت (شکل ۱-D).

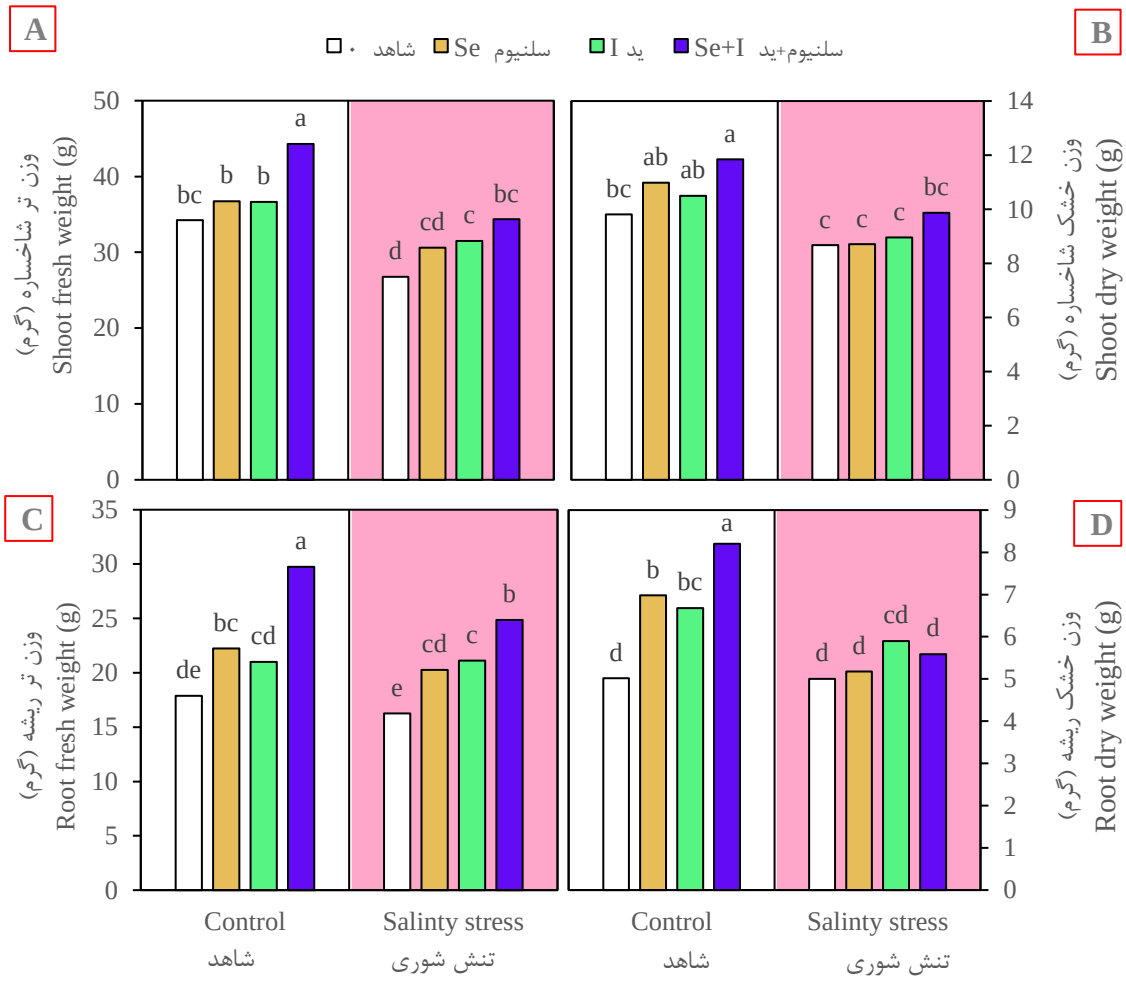
جدول ۱- تجزیه واریانس تأثیر تیمارهای کودی سلنیوم و ید بر صفات مورفولوژیکی توت‌فرنگی تحت تنش شوری

Table 1. Analysis of variance of the effect of selenium and iodine nutrient treatments on strawberry morphological traits under salt stress

منابع تغییر Source of variation	درجه آزادی df	وزن تر شاخساره Shoot fresh weight	وزن خشک شاخساره Shoot dry weight	وزن تر ریشه Root fresh weight	وزن خشک ریشه Root dry weight	سطح برگ Leaf area
تنش شوری (A) Salinity stress	1	412.20 **	23.98 **	10.70 ns	2.44 *	2641.28 *
تیمارهای کودی (B) Nutrient treatment	3	65.08 **	1.97 *	123.97 **	9.52 *	85.82 *
A×B	3	50.92 **	2.17 **	35.72 **	1.75 *	1267.34 *
خطا Error	24	8.27	1.10	4.61	0.50	18.57
ضریب تغییرات Coefficient of variance (C.V.%)		8.36	1.58	9.90	1.63	3.92

ns ، * ، ** به ترتیب بیانگر عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد می‌باشد.

ns, *, ** indicate non-significance and significance at the P < 0.05 and P < 0.01 levels, respectively.

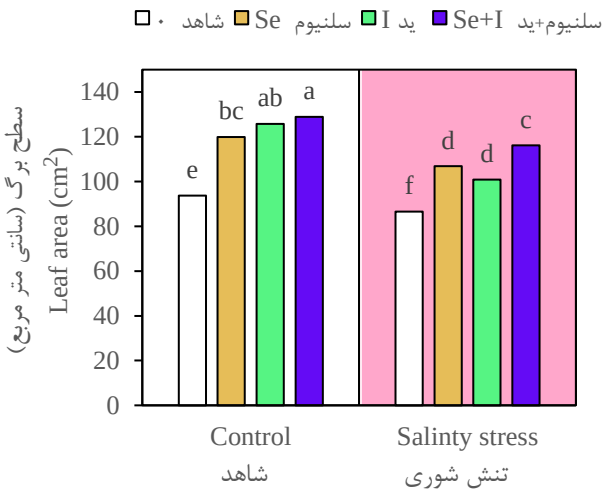


شکل ۱- تاثیر تیمارهای کودی سلنیوم و ید بر وزن تر شاخساره (A)، وزن خشک شاخساره (B)، وزن تر ریشه (C)، وزن خشک ریشه (D) توت‌فرنگی تحت تنش شوری. میانگین‌هایی که دارای حروف مشابه هستند، بر اساس آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۵ درصد، تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

Fig. 1. Effects of selenium and iodine nutrient treatments on shoot fresh weight (A), shoot dry weight (B), root fresh weight (C), and root dry weight (D) of strawberry under salt stress. Means followed by the same letter are not significantly different according to the least significant difference (LSD) test at $P \leq 0.05$.

سطح برگ

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۱) نشان داد، برهمکنش تنش شوری و تیمار کودی (A×B) بر سطح برگ، در سطح احتمال پنج درصد (P<0.05) معنی‌دار بود. در زمان بدون تنش شوری، کاربرد سلنیوم (۱۱۹/۹۵ سانتی‌متر مربع)، ید (۱۲۵/۷۱ سانتی‌متر مربع) و ترکیب سلنیوم و ید (۱۲۸/۹۳ سانتی‌متر مربع) به ترتیب باعث افزایش ۲۸، ۳۴ و ۳۸ درصدی سطح برگ نسبت به شاهد (۹۳/۶۸ سانتی‌متر مربع) شد، اما در شرایط تنش شوری کاربرد سلنیوم (۱۰۶/۸۵ سانتی‌متر مربع)، ید (۱۰۰/۸۸ سانتی‌متر مربع) و ترکیب سلنیوم و ید (۱۱۶/۲۰ سانتی‌متر مربع) به ترتیب باعث افزایش ۲۴، ۱۷ و ۳۴ درصدی سطح برگ نسبت به شاهد (۸۶/۵ سانتی‌متر مربع) شد (شکل ۲).



شکل ۲- تاثیر تیمارهای کودی سلنیوم و ید بر سطح برگ توت‌فرنگی تحت تنش شوری. میانگین‌هایی که دارای حروف مشابه هستند، بر اساس آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۵ درصد، تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

Fig. 2. The effects of selenium and iodine nutrient treatments on the strawberry leaf area under salt stress. Means followed by the same letter are not significantly different according to the least significant difference (LSD) test at $P \leq 0.05$.

میانگین وزن میوه اولیه و ثانویه

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که برهمکنش تنش شوری و تیمار کودی (A×B) بر میانگین وزن میوه اولیه و ثانویه به ترتیب در سطح احتمال پنج درصد (P<0.05) و یک درصد (P<0.01) معنی‌دار بود (جدول ۲). در شرایط بدون تنش شوری، کاربرد سلنیوم و تیمار ترکیبی ید و سلنیوم توانست میانگین وزن میوه اولیه را به ترتیب ۲۹ و ۳۵ درصد نسبت به شاهد افزایش دهد هرچند که این دو تیمار تفاوت معنی‌داری با یکدیگر نداشتند (شکل ۳-A). همچنین در زمان اعمال تنش شوری، کاربرد سلنیوم، ید و تیمار ترکیبی سلنیوم و ید میانگین وزن میوه اولیه را به ترتیب به میزان ۴۳، ۲۵ و ۴۶ درصدی نسبت به شاهد (۴/۹۹ گرم) افزایش داد (شکل ۳-A). نکته قابل توجه اینکه کاربرد سلنیوم به تنهایی و ترکیبی در شرایط تنش شوری باعث افزایش وزن میوه اولیه شد تا جایی که از لحاظ آماری تفاوتی با تیمارهای بدون تنش شوری نداشت (شکل ۳-A). همچنین در زمان بدون تنش شوری، کاربرد سلنیوم و تیمار ترکیبی سلنیوم و ید میانگین وزن میوه ثانویه را به ترتیب به میزان ۲۶ و ۳۹ درصد نسبت به شاهد افزایش داد ولی تفاوت معنی‌داری از لحاظ آماری بین این دو تیمار مشاهده نشد (شکل ۳-B). همچنین در زمان اعمال تنش شوری، میانگین وزن میوه ثانویه در هنگام استفاده از تیمار ترکیبی سلنیوم و ید (۶/۵۰ گرم) به میزان ۷۱ درصد نسبت به شاهد (۳/۵۴ گرم) افزایش یافت که نقش چشمگیر سلنیوم و ید را در افزایش وزن میوه ثانویه در شرایط تنش نشان داد (شکل ۳-B).

میانگین طول میوه

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۲) نشان داد که برهمکنش تنش شوری و تیمار کودی (A×B) بر میانگین طول میوه در سطح احتمال یک درصد (P<0.01) معنی‌دار بود. در زمان بدون تنش شوری، کاربرد سلنیوم، ید و تیمار ترکیبی سلنیوم و ید توانست میانگین طول میوه را حدود ۱۵ درصد نسبت به شاهد افزایش دهد ولی تفاوت معنی‌داری بین تیمارها مشاهده نشد (شکل ۳-C). همچنین در زمان اعمال تنش شوری، میانگین طول میوه در هنگام استفاده از تیمارهای سلنیوم، ید و تیمار ترکیبی سلنیوم و ید، به میزان ۱۳ درصد باعث افزایش نسبت به شاهد شدکه از نظر آماری تفاوت معنی‌داری بین تیمارها مشاهده نشد (شکل ۳-C).

میانگین قطر میوه

برهمکنش تنش شوری و تیمار کودی (A×B) بر میانگین قطر میوه در سطح احتمال یک درصد ($P<0.01$) معنی‌دار شد (جدول ۲). در زمان بدون تنش شوری، کاربرد سلنیوم، ید و ترکیب سلنیوم و ید تفاوت معنی‌داری با شاهد نداشت، اما در زمان اعمال تنش شوری، کاربرد سلنیوم (۲۶/۸۲ میلی‌متر)، ید (۲۴/۱۵ میلی‌متر) و تیمار ترکیبی سلنیوم و ید (۲۷/۲۰ میلی‌متر) به ترتیب باعث افزایش ۲۰، ۱۰ و ۲۱ درصدی میانگین قطر میوه نسبت به شاهد (۲۱/۵۴ میلی‌متر) شد (شکل ۳-D).

جدول ۲- تجزیه واریانس تأثیر تیمارهای کودی سلنیوم و ید بر صفات عملکردی توت‌فرنگی تحت تنش شوری

Table 2. Analysis of variance of the effect of selenium and iodine nutrient treatments on strawberry yield traits under salt stress

منابع تغییر Source of variation	درجه آزادی df	میانگین وزن میوه اولیه Average primary fruit weight	میانگین وزن میوه ثانویه Average secondary fruit weight	میانگین طول میوه Average fruit length	میانگین قطر میوه Average fruit diameter	میانگین تعداد فندقه Average number of achene	عملکرد میوه در هر بوته Total yield
تنش شوری (A) Salinity stress	1	5.97 *	7.45 **	28.31 **	43.57 **	8192.00 *	0.01 ns
تیمارهای کودی (B) Nutrient treatment	3	9.08 *	2.03 **	7.49 ns	10.62 **	1427.76 *	180.75 **
A×B	3	17.52 *	5.87 **	20.69 **	26.64 **	938.33 **	327.45 **
خطا Error	24	0.99	0.53	6.51	5.27	82.94	14.98
ضریب تغییرات Coefficient of variance (C.V.%)		9.75	1.74	7.86	8.77	4.37	1.52

ns ، * ، ** به ترتیب بیانگر عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد می‌باشد.

ns, *, ** indicate non-significance and significance at the $P < 0.05$ and $P < 0.01$ levels, respectively.

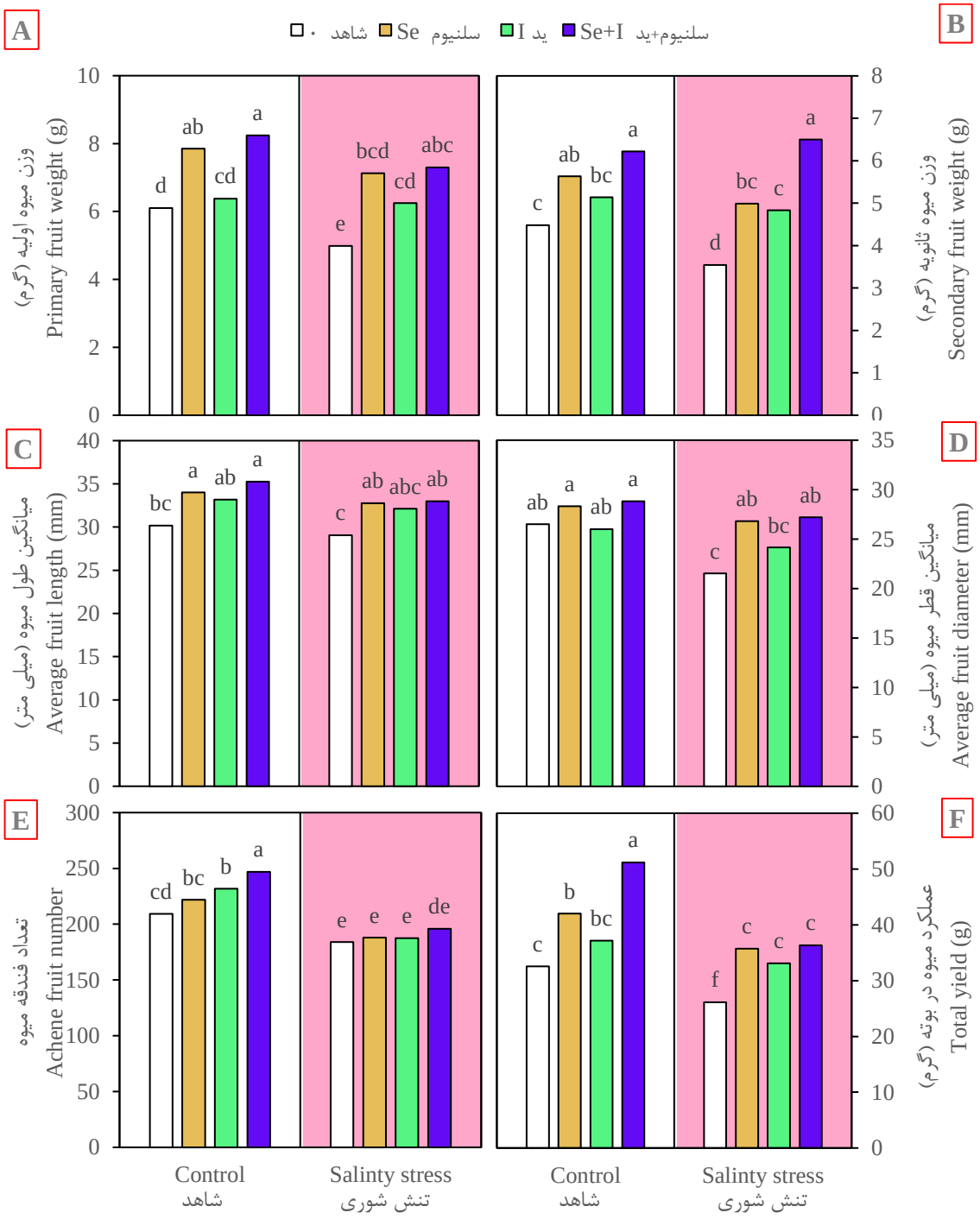
میانگین تعداد فندقه

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد برهمکنش تنش شوری و تیمار کودی (A×B) بر میانگین تعداد فندقه میوه در سطح احتمال یک درصد ($P<0.01$) معنی‌دار بود (جدول ۲). در زمان بدون تنش شوری، کاربرد تیمار ترکیبی سلنیوم و ید (۲۴۷ عدد) باعث افزایش ۱۸ درصدی میانگین تعداد فندقه میوه نسبت به شاهد (۲۰۹ عدد) شد، اما در زمان اعمال تنش شوری، تیمار ترکیبی سلنیوم و ید (۱۹۶ عدد)، باعث افزایش ۶ درصدی میانگین تعداد فندقه میوه شود که از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری با بقیه تیمارها در شرایط تنش شوری نداشت (شکل ۳-E).

عملکرد میوه در هر بوته

با توجه به نتایج برهمکنش تنش شوری و تیمار کودی (A×B) بر عملکرد میوه در هر بوته در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). در شرایط بدون تنش شوری، کاربرد سلنیوم (۴۲/۰۱ گرم)، ید (۳۷/۱۶ گرم) و تیمار ترکیبی سلنیوم و ید (۵۱/۱۹ گرم) به ترتیب باعث افزایش ۲۹، ۱۴ و ۵۷ درصدی عملکرد میوه در هر بوته نسبت به شاهد (۳۲/۵۵ گرم) شد

(شکل ۳-F). در شرایط تنش شوری، کاربرد سلنیوم (۳۵/۷۵ گرم)، ید (۳۳/۰۹ گرم) و تیمار ترکیبی سلنیوم و ید (۳۶/۳۳ گرم) به ترتیب باعث افزایش ۳۷، ۲۷ و ۳۹ درصدی عملکرد میوه در هر بوته نسبت به شاهد (۲۶/۱۴ گرم) شد (شکل ۳-F).



شکل ۳- تاثیر تیمارهای کودی سلنیوم و ید بر وزن میوه اولیه (A)، وزن میوه ثانویه (B)، میانگین طول میوه (C)، میانگین قطر میوه (D)، میانگین تعداد فندقه (E) و عملکرد میوه در هر بوته (F) توت‌فرنگی تحت تنش شوری. میانگین‌هایی که دارای حروف مشابه هستند، بر اساس آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۵ درصد، تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

Fig. 3. Effect of selenium and iodine nutrient treatments on primary fruit weight (A), secondary fruit weight (B), average fruit length (C), average fruit diameter (D), average number of achenes (E), and fruit yield (F) of strawberry under salt stress. Means followed by the same letter are not significantly different according to the least significant difference (LSD) test at $P \leq 0.05$.

مواد جامد محلول (TSS)

نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان داد که برهمکنش شوری و تیمار کودی (A×B) در سطح احتمال یک درصد ($P<0.01$) بر میزان TSS معنی‌دار بود (جدول ۳). در شرایط بدون تنش، کاربرد سلنیوم (۱۰/۰۷ ٪)، ید (۹/۱۷ ٪) و ترکیب سلنیوم و ید (۱۰/۰ ٪) به ترتیب باعث افزایش ۱۲، ۲ و ۱۱ درصدی TSS نسبت به شاهد (۹/۰ ٪) شد (جدول ۴). در شرایط تنش شوری، کاربرد سلنیوم (۹/۵۰ ٪) ، ید (۹/۴۷ ٪) و ترکیب سلنیوم و ید (۹/۹۷ ٪) به ترتیب باعث افزایش ۸، ۷ و ۱۳ درصدی TSS نسبت به شاهد در همان شرایط (۸/۸۲ ٪) شد (جدول ۴).

اسید قابل تیتراسیون (TA)

نتایج نشان داد برهمکنش تنش شوری و تیمار کودی (A×B) بر TA در سطح احتمال یک درصد ($P<0.01$) معنی‌دار شد (جدول ۳). در زمان بدون تنش شوری، کاربرد سلنیوم (۰/۹۸ ٪) به تنهایی و ترکیب با ید (۰/۹۸ ٪) به ترتیب توانست میزان TA را ۱۶ و ۱۶ درصد نسبت به شاهد (۰/۸۴ ٪) افزایش دهد (جدول ۴). همچنین در زمان اعمال تنش شوری، کاربرد سلنیوم (۱/۰۲ ٪)، ید (۱/۰۱ ٪) و ترکیب سلنیوم وید (۱/۰۶ ٪) به ترتیب باعث افزایش ۴۷، ۴۶ و ۵۳ درصدی TA نسبت به شاهد (۰/۷۰ ٪) شد (جدول ۴).

جدول ۳- تجزیه واریانس تأثیر تیمارهای کودی سلنیوم و ید بر صفات کیفی میوه توت‌فرنگی تحت تنش شوری.

Table 3. Analysis of variance of the effects of selenium and iodine nutrient treatments on strawberry fruit quality traits under salinity stress.

منابع تغییر Source of variation	درجه آزادی df	مواد جامد محلول Total soluble solids (TSS)	اسیدقابل تیتراسیون Titratable acidity (TA)	ویتامین C Vitamin C	فنول کل Total phenols	آنتوسیانین Anthocyanins
تنش شوری (A) Salinity stress	1	0.11 **	2.64 **	5025.03 **	0.61 ns	3612.63 **
تیمارهای کودی (B) Nutrient treatment	3	1.86 **	0.55 **	467.86 **	1.44 **	1445.74 **
A×B	3	0.26 **	0.27 **	772.03 **	2.10 **	1575.12 **
خطا Error	24	0.34	0.06	100.95	0.39	13.68
ضریب تغییرات Coefficient of variance (C.V.%)		6.10	7.57	3.87	1.28	4.02

ns ، * ، ** به ترتیب بیانگر عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد می‌باشد.

ns, *, ** indicate non-significance and significance at the P < 0.05 and P < 0.01 levels, respectively.

میزان ویتامین C

برهمکنش تنش شوری و تیمار کودی (A×B) در سطح احتمال یک درصد ($P<0.01$) بر میزان ویتامین C معنی‌دار بود (جدول ۳). در زمان بدون تنش شوری، کاربرد سلنیوم، ید و ترکیب سلنیوم وید به ترتیب باعث افزایش ۲۱، ۲۱ و ۲۸ درصدی ویتامین C نسبت به شاهد (۱۲۳ میلی‌گرم در گرم وزن تر میوه) شد (جدول ۴). همچنین در زمان اعمال تنش شوری، کاربرد سلنیوم، ید و ترکیب سلنیوم وید به ترتیب باعث افزایش ۲۳، ۲۲ و ۲۷ درصدی ویتامین C نسبت به شاهد شد (۹۹/۵ میلی‌گرم در گرم وزن تر میوه) که بین تیمارهای سلنیوم، ید و ترکیب سلنیوم و ید از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری وجود نداشت (جدول ۴).

میزان فنول کل

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد برهمکنش تنش شوری و تیمار کودی (A×B) در سطح احتمال یک درصد ($P<0.01$) بر میزان فنول کل معنی‌دار بود (جدول ۳). در شرایط بدون تنش شوری، استفاده ترکیبی از عناصر سلنیوم و ید باعث بیشترین میزان فنول کل (۵/۶۵ میلی‌گرم گالیک اسید در گرم میوه) شد که افزایش ۲۶ درصدی نسبت به شاهد (۴/۴۸ میلی‌گرم گالیک اسید در گرم میوه) در همان شرایط را نشان داد (جدول ۴). همچنین در زمان اعمال تنش شوری، کاربرد سلنیوم، ید و ترکیب سلنیوم ویدبه ترتیب باعث افزایش ۷، ۳ و ۹ درصدی فنول کل نسبت به شاهد (۵/۷۶ میلی‌گرم گالیک اسید در گرم میوه) در همان شرایط شد که تفاوت معنی‌داری بین تیمارها و شاهد در شرایط شوری وجود نداشت (جدول ۴).

میزان آنتوسیانین

برهمکنش تنش شوری و تیمار کودی (A×B) در سطح احتمال یک درصد ($P<0.01$) بر میزان آنتوسیانین میوه معنی‌دار بود (جدول ۳). تنش شوری باعث افزایش محتوای آنتوسیانین میوه شد. کاربرد سلنیوم و ترکیب سلنیوم و ید در زمان بدون تنش شوری به ترتیب باعث افزایش ۸ و ۱۸ درصدی میزان آنتوسیانین نسبت به شاهد (۶۹/۸۷ میلی‌گرم سیانیدین-۳-گلوکوزاید در ۱۰۰ گرم میوه) در همان شرایط شد به طوری که این افزایش در تنش شوری ۲۸ و ۴۱ درصد نسبت به شاهد در همان شرایط (۹۲/۲۳ میلی‌گرم سیانیدین-۳-گلوکوزاید در ۱۰۰ گرم میوه) بود (جدول ۴). کاربرد ید در شرایط بدون تنش باعث افزایش ۱۳ درصدی میزان آنتوسیانین نسبت به شاهد شد اما در شرایط تنش باعث کاهش ۴ درصدی میزان آنتوسیانین نسبت به شاهد در همان شرایط شد (جدول ۴).

جدول ۴- تأثیر تیمارهای کودی سلنیوم و ید بر صفات کیفی میوه توت‌فرنگی تحت تنش شوری.

Table 4. The effects of selenium and iodine nutrient treatments on strawberry fruit quality traits under salt stress

تنش شوری Salinity stress	تیمارهای کودی Nutrient treatment	مواد جامد محلول Total soluble solids (TSS)	اسیدقابل تیتراسیون Titratable acidity (TA)	ویتامین C Vitamin C	فنول کل Total phenols	آنتوسیانین Anthocyanins
		درصد %	درصد %	میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم وزن‌تر میوه mg/100g fresh weight	میلی گرم گالیک اسید در گرم میوه mg Gallic acid/ g fresh weight	میلی‌گرم سیانیدین - ۳-گلوکوزاید در ۱۰۰ گرم میوه mg ciyanidin-3-glocoside/100g fruit
بدون تنش No stress	0	9.00 c †	0.84 c	123.00 b	4.48 d	69.87 f
	Se	10.07 a	0.98 ab	149.00 a	5.12 bcd	75.69 e
	I	9.17 bc	0.91 bc	149.00 a	4.93 cd	78.66 de
	Se+I	10.00 ab	0.98 ab	157.25 a	5.65 abc	82.28 d
تنش شوری ۴۰ میلی‌مولار 40 mM NaCl	0	8.82 c	0.70 d	99.50 c	5.76 abc	92.23 c
	Se	9.50 abc	1.02 a	122.00 b	6.17 a	117.99 b
	I	9.47 abc	1.01 ab	121.50 b	5.92 ab	88.59 c
	Se+I	9.97 ab	1.06 a	126.00 b	6.27 a	130.12 a

†حروف مشترک در هر ستون نشان دهنده عدم معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ توسط آزمون LSD است.

†Common letters in each column indicate non-significance at the 5% probability level by the LSD test

بحث

نتایج این پژوهش نشان داد که تنش شوری سبب کاهش معنی‌دار وزن تر و خشک ریشه و اندام هوایی، سطح برگ، صفات کمی میوه و عملکرد کل گیاه توت‌فرنگی شد. این نتایج با گزارش‌های متعدد درباره اثرات منفی شوری بر رشد و تولید

محصولات باغبانی مطابقت دارد (Parihar *et al.*, 2015; Munns *et al.*, 2006; Jiang *et al.*, 2017). کاهش وزن تر و خشک ریشه، اندام هوایی و سطح برگ در گیاهان در معرض تنش شوری به دلیل انباشته شدن یون‌های مضر در خاک مانند کلر و سدیم است که باعث اختلال ریشه در جذب عناصر غذایی از بستر کاشت می‌شود. محققان بیان کرده‌اند به دلیل اختلال در سوخت و ساز و تنفس در ریشه، جذب عناصر غذایی با مشکل مواجه می‌شود و بنابراین سطح برگ گسترش پیدا نمی‌کند و باعث کاهش رشد گیاه می‌شود. تنش شوری با تنش خشکی در این زمان توأم گشته و منجر به شرایط کمبود آب در گیاه می‌شود و گیاه دچار تنش اسمزی گشته و تعادل توزیع یونی در سلول‌ها، دچار اختلال می‌شود. شوری بستر بر استقرار، رشد و نمو گیاهان تأثیر گذاشته و منجر به تلفات عظیمی در تولید می‌شود (Mousavi *et al.*, 2022). کاهش جذب آب به دلیل تنش شوری باعث محدود شدن توسعه سلولی می‌شود و به دنبال آن سطح برگ و ماده خشک کاهش می‌یابد (Parihar *et al.*, 2015; Hasanuzzaman *et al*., 2022).

در پژوهش حاضر، کاربرد سلنیوم از طریق محلول غذایی و ید به صورت محلول‌پاشی برگی توانست اثرات منفی شوری را تا حد زیادی تعدیل کند. بهبود وزن تر و خشک ریشه و شاخساره در تیمارهای حاوی سلنیوم احتمالاً ناشی از افزایش کارآیی جذب عناصر غذایی و حفظ پایداری غشاهای سلولی بوده است. در سیستم هیدروپونیک، سلنیوم به دلیل دسترسی مستقیم در محلول غذایی، با سرعت بیشتری توسط ریشه جذب شده و در تنظیم تعادل یونی مشارکت می‌کند. سلنیوم می‌تواند تجمع سدیم را کاهش داده و نسبت پتاسیم به سدیم را در گیاه بهبود بخشد و این امر برای حفظ فعالیت آنزیمی و رشد گیاه اهمیت فراوانی دارد که این اثر در گوجه‌فرنگی (Mozafariyan *et al.*, 2016) و ذرت (Jiang *et al.*, 2017) تحت تنش شوری گزارش شد. افزایش وزن خشک گیاه و عملکرد با کاربرد سلنیوم در دوگونه تره ایرانی و تره کوهی (غلظت ۲ میلی‌گرم در لیتر) و توت‌فرنگی (غلظت ۱ میلی‌گرم در لیتر) گزارش شده است (Karimi & Saiedikhah, 2018; Mohebi *et al.*, 2024) که نتایج ما با این پژوهش‌ها هم راستا است.

تنش شوری به طور عمده بر روی گیاه و سلول‌ها تأثیر گذاشته و رشد رویشی را کاهش می‌دهد (Astaneh *et al*., 2019). سلنیوم با افزایش ظرفیت دفاع آنتی‌اکسیدانی، حفظ ساختار کلروپلاست و کاهش پراکسیداسیون لیپیدی سبب افزایش رشد گیاه می‌شود (Khalofah *et al.*, 2021). استفاده از Se بر روی بوته‌های سیر باعث شد، وزن تر و خشک ریشه و اندام هوایی و همچنین قطر پیاز و ارتفاع گیاه افزایش پیدا نماید که نتایج ما با این گزارش همخوانی دارد (Astaneh *et al*., 2019).

افزایش سطح برگ در تیمارهای حاوی سلنیوم و ید را می‌توان به حفظ وضعیت آبی گیاه و بهبود فرآیند فتوسنتز نسبت داد. در تنش شوری میزان سدیم کلرید در محیط ریشه مانع جذب عناصر غذایی به خصوص پتاسیم شده و بنابراین رشد رویشی گیاه دچار اختلال می‌شود. گزارش شده است که سلنیوم و ید (در غلظت‌های پایین) با کاهش خسارت اکسیداتیو و حفظ رنگیزه‌های فتوسنتزی، موجب بهبود فتوسنتز و تولید بیشتر ماده خشک تحت تنش شوری در توت‌فرنگی (Habib & Elyaghi, 2019) و ذرت (Jiang *et al.*, 2017) شدند.

نتایج این پژوهش نشان داد که شوری موجب کاهش وزن، طول، قطر و فندقه میوه‌های اولیه و ثانویه و در نهایت کاهش عملکرد شد. در توت‌فرنگی میوه‌های اول و دوم به عنوان محصول اقتصادی هستند و کاهش اندازه میوه می‌تواند به شدت بر روی بازار پسندی و فروش تأثیر گذار باشد (Menzel, 2019). در تنش شوری، کاهش فتوسنتز و محدود شدن انتقال مواد فتوسنتزی به میوه از مهم‌ترین دلایل کاهش وزن، طول و قطر میوه‌های اولیه و ثانویه و به دنبال آن عملکرد محسوب می‌شود. افزون بر این، کاهش جذب آب در مراحل رشد میوه سبب محدود شدن تقسیم و بزرگ شدن سلول‌ها شده و اندازه میوه را کاهش می‌دهد (Munns *et al.*, 2006). بهبود عملکرد در تیمارهای حاوی سلنیوم و ید احتمالاً ناشی از افزایش کارآیی فتوسنتز، حفظ سطح برگ فعال و بهبود انتقال کربوهیدرات‌ها به اندام‌های زایشی بوده است. پژوهش انجام گرفته روی فلفل و نخود نشان داد، محلول‌پاشی با عناصر سلنیوم و ید باعث افزایش وزن تر و خشک و افزایش عملکرد بوته شد (Golubkina *et al*., 2021; Hassan *et al.*, 2023).

تنش شوری باعث کاهش میزان TSS، TA و ویتامین C شد اما میزان آنتوسیانین و فنول کل میوه افزایش یافت و کاربرد سلنیوم و ید باعث بهبود این ویژگی‌ها شد (جدول ۴). کاهش شاخص‌های کیفی میوه تحت تنش شوری نشان داد که شدت

تنش اعمال شده بالا بوده و افزون بر محدود کردن رشد رویشی (شکل‌های ۱و ۲)، بر فرآیندهای متابولیکی مرتبط با تشکیل و تجمع ترکیبات کیفی میوه نیز اثر منفی گذاشت. در سیستم‌های کشت بدون خاک، افزایش شوری محلول‌غذایی و بستر کشت مستقیماً سبب کاهش پتانسیل آب محیط ریشه می‌شود و جذب آب و عناصر غذایی را محدود می‌کند. در چنین شرایطی، تجمع یون‌های سدیم و کلر در بافت‌های گیاهی موجب برهم خوردن تعادل یونی، کاهش فتوسنتز و اختلال در انتقال مواد فتوسنتزی به میوه می‌شود (Munns *et al.*, 2006; Jiang *et al.*, 2017). از آنجا که بخش عمده TSS میوه توت‌فرنگی را قندهای محلول تشکیل می‌دهند، کاهش فتوسنتز و تولید کربوهیدرات‌ها می‌تواند یکی از مهم‌ترین دلایل کاهش TSS در شرایط شوری باشد. علاوه بر این، محدود شدن فعالیت آنزیم‌های دخیل در متابولیسم کربوهیدرات‌ها و کاهش انتقال ساکارز از برگ به میوه نیز در این فرآیند نقش دارد (Karakas *et al.*, 2021).

تنش شوری موجب تشدید و به وجود آمدن تنش اکسیداتیو در گیاه شده که معمولا با تنش اسمزی و یونی همراه است و موجب تخریب لیپیدهای غشایی، پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک می‌شود (Jiang *et al.*, 2017). در نتیجه، فعالیت آنزیم‌های مرتبط با سنتز ترکیبات ثانویه کاهش یافته و ظرفیت متابولیکی گیاه برای تولید ترکیبات با ارزش تغذیه‌ای محدود می‌شود. کاهش ویتامین C و فنول کل مشاهده شده در این پژوهش احتمالاً ناشی از محدود شدن سنتز پیش‌سازهای کربنی مورد نیاز برای تولید این ترکیبات بوده است. گزارش شده است که در شرایط تنش شدید، کاهش فتوسنتز و کمبود انرژی می‌تواند موجب کاهش تولید متابولیت‌های ثانویه از جمله ترکیبات فنولی شود (Talbi *et al.*, 2015; Hasanuzzaman *et al.*, 2022).

زمانی که به وسیله راهکارهای مانند استفاده از سلنیوم و ید، گیاه در برابر تنش وارده متحمل می‌شود، گیاه می‌تواند توسط مکانیسم‌های دفاعی خود، پتانسیل آب درونی سلول‌ها را با تجمع سریع از مواد تنظیمی اسمزی با محلول‌های سازگار اسمزی مانند قندهای محلول مانند ساکاروز، گلوکز و فروکتوز در یک دوره افزایش و تجمع بدهد و موجب مقاومت در برابر تنش شود (Bai *et al.*, 2022). کاربرد سلنیوم و ید همچنین باعث افزایش پلی‌فنول‌ها می‌شود. زمانی که گیاه دچار تنش‌های محیطی می‌شود از خود در برابر این گونه واکنش‌ها دفاع می‌نماید. به طور مثال تنش اکسیداتیو در اثر تجمع گونه‌های فعال اکسیژن رخ می‌دهد که همراه با تنش اسمزی و سمیت یونی درون سلول اتفاق می‌افتند و بر روی تنفس گیاه سیر تأثیر می‌گذارند (Astaneh *et al.*, 2019)، در نتیجه در این زمان گیاه یک سری واکنش برای مقابله با این آسیب‌ها از خود نشان می‌دهد. یکی از این واکنش‌ها، حفظ و افزایش سطح برگ در اثر کاربرد سلنیوم است که می‌تواند در شرایط تنش‌های محیطی به افزایش عملکرد و به‌تبع آن افزایش عملکرد میوه منجر شود. نتایج نشان می‌دهد کاربرد همزمان عناصر سلنیوم و ید در محصولات باغی و زراعی می‌تواند میزان این دو عنصر را در محصولات افزایش دهد و همچنین سطح آنتوسیانین در میوه‌ها را بالا برده و به عنوان مکمل غذایی از آن‌ها استفاده شود (Golob *et al.*, 2020). همچنین کاربرد همزمان سلنیوم و ید بر روی بذور گندم سیاه باعث افزایش میزان آنتوسیانین و پلی‌فنول شد (Golubkina *et al.*, 2021). همچنین کاربرد ید در شرایط تنش شوری بر روی بوته‌های توت‌فرنگی نشان داد عنصر ید به عنوان یک عنصر ضروری برای رشد می‌تواند باعث افزایش زیست‌توده، افزایش ترکیبات فنولی در میوه و همچنین افزایش قندهای محلول، افزایش جذب عناصر کلسیم و منیزیم و به دنبال آن افزایش کیفیت میوه شود (Macias *et al.*, 2021) که یافته‌های این پژوهش با این یافته‌ها هم‌خوانی داشت. به‌طور کلی، روابط پیشنهادی میان تنش شوری، پاسخ‌های فیزیولوژیک و اثرات کاربرد سلنیوم و ید بر صفات مورد بررسی این پژوهش در شکل ۴ به‌صورت شماتیک خلاصه شده است.

شکل ۴. مدل مفهومی پیشنهادی اثر تنش شوری و نقش سلنیوم (Se) و ید (I) در تعدیل پاسخ‌های توت‌فرنگی رقم کردستان.

Fig. 4. Proposed conceptual model illustrating the effects of salinity stress and the roles of selenium (Se) and iodine (I) in modulating the responses of the strawberry 'Kurdistan' cultivar.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تنش شوری باعث کاهش وزن تر و خشک ریشه و اندام هوایی، سطح برگ، وزن، طول و قطر میوه اولیه و ثانویه، عملکرد، مواد جامد محلول، اسیدیته قابل تیتراسیون و ویتامین C شد، اما کاربرد سلنیوم (یک میلی‌گرم در لیتر سلنات سدیم از طریق محلول‌غذایی) و ید (یک میکرومولار پتاسیم یدات به صورت محلول‌پاشی)، به ویژه به صورت همزمان باعث بهبود بسیاری از این صفات شد. در شرایط تنش شوری، کاربرد منفرد سلنیوم در وزن میوه‌های اولیه و ثانویه و بسیاری از صفات کیفی میوه عملکردی مشابه با کاربرد همزمان سلنیوم و ید داشت، در حالی که کاربرد ترکیبی این دو عنصر مزیت بیشتری را در برخی صفات مرتبط با اندازه و بازارپسندی میوه نشان داد. بنابراین، کاربرد سلنیوم یا ید به‌صورت منفرد می‌تواند گزینه‌ای بالقوه برای کاهش اثرات نامطلوب شوری و بهبود عملکرد و کیفیت میوه باشد، در حالی که استفاده همزمان از این دو عنصر می‌تواند در شرایطی که افزایش اندازه و بازارپسندی میوه مدنظر است، مزیت بیشتری داشته باشد.

References منابع

Abidin, Z. U., Safura, B. I. B. I., Mahmood, A., Soysal, S., Erden, Z., Toprak, Ç. C., Gharzeddin, K., Ibrahim, A.A., El Sabagh, A., & Elnaggar, N. (2025). Exogenous selenium application enhances the photosynthetic pigment and antioxidant defense of mash bean (*Vigna mungo*) to confer tolerance to salt stress. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, *53*(1), 14180-14180. https://doi.org/10.15835/nbha53114180

Astaneh, R.K., Bolandnazar, S., Nahandi, F.Z., & Oustan, S. (2019). Effects of selenium on enzymatic changes and productivity of garlic under salinity stress. *South African Journal of Botany*, *121*, 447-455. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2018.10.037

Babalar, M., Mohebbi, S., Zamani, Z., & Askari, M. A. (2019). Effect of foliar application with sodium selenate on selenium biofortification and fruit quality maintenance of 'Starking Delicious' apple during storage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *99*(11), 5149-5156. https://doi.org/10.1002/jsfa.9761

Bai, D., Li, Z., Gu, S., Li, Q., Sun, L., Qi, X., Fang, J., Zhong, Y., & Hu, C. (2022). Effects of kiwifruit rootstocks with opposite tolerance on physiological responses of grafting combinations under waterlogging stress. *Plants*, *11*(16), 2098. https://doi.org/10.3390/plants11162098

Bor, J. Y., Chen, H. Y., & Yen, G. C. (2006). Evaluation of antioxidant activity and inhibitory effect on nitric oxide production of some common vegetables. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *54*(5), 1680-1686. https://doi.org/10.1021/jf0527448

Chen, A., Feng, Y., Yang, Y., Kong, Y., Wang, H., Rehman, M., Maqbool, Z., Fahad, S., Deng, G., & Wang, H. (2025). Enhancing potato (*Solanum tuberosum* L.) resilience: The role of selenium in modulating growth, antioxidant capacity, and tuber quality under salinity stress. *Journal of Agriculture and Food Research*, 102259. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.102259

Consentino, B. B., Vultaggio, L., Iacuzzi, N., La Bella, S., De Pasquale, C., Rouphael, Y., Ntatsi, G., Virga, G., & Sabatino, L. (2023). Iodine biofortification and seaweed extract-based biostimulant supply interactively drive the yield, quality, and functional traits in strawberry fruits. *Plants*, *12*(2), 245. https://doi.org/10.3390/plants12020245

Eshghi, S., Moharami, S., & Jamali, B. (2016). Effect of salicylic acid on growth, yield and fruit quality of strawberry cv. 'Paros' under salinity conditions. *Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture*, *7*(4), 163-174. http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.ejgcst.7.4.163 (In Persian)

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2024). FAOSTAT statistical database. Retrieved June 13, 2026, from https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL

Ghanbari, F., Bag-Nazari, M., & Azizi, A. (2023). Exogenous application of selenium and nano-selenium alleviates salt stress and improves secondary metabolites in lemon verbena under salinity stress. *Scientific Reports*, *13*(1), 5352. https://doi.org/10.1038/s41598-023-32436-4

Ghasemnezhad, M., Sherafati, M., & Payvast, G. A. (2011). Variation in phenolic compounds, ascorbic acid and antioxidant activity of five coloured bell pepper (*Capsicum annum*) fruits at two different harvest times. *Journal of Functional Foods*, *3*(1), 44-49. https://doi.org/10.1016/j.jff.2011.02.002

Ghasemnezhad, M., Shiri, M. A., & Sanavi, M. (2010). Effect of chitosan coatings on some quality indices of apricot (*Prunus armeniaca* L.) during cold storage. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, *8*(1), 25-33.

Golob, A., Kroflic, A., Jerse, A., Kacjan Marsic, N., Sircelj, H., Stibilj, V., & Germ, M. (2020). Response of pumpkin to different concentrations and forms of selenium and iodine, and their combinations. *Plants*, *9*(7), 899. https://doi.org/10.3390/plants9070899

Golubkina, N., Gomez, L. D., Kekina, H., Cozzolino, E., Simister, R., Tallarita, A., Torino, V., Koshevarov, A., Cuciniello, A., Maiello, R., Cenvinzo, V., & Caruso, G. (2020). Joint selenium–iodine supply and arbuscular mycorrhizal fungi inoculation affect yield and quality of chickpea seeds and residual biomass. *Plants*, *9*(7), 804. https://doi.org/10.3390/plants9070804

Gonzali, S., Kiferle, C., & Perata, P. (2017). Iodine biofortification of crops: agronomic biofortification, metabolic engineering and iodine bioavailability. *Current opinion in biotechnology*, *44*, 16-26. https://doi.org/10.1016/j.copbio.2016.10.004

Habib, G., & Elyaghi, S. (2019). Effect of foliar application of potassium iodate on strawberry tolerance to salinity stress. *Iranian Journal of Horticultural Science, 50* (2), 361-374. https://doi.org/10.22059/ijhs.2018.254022.1418 (In Persian)

Hasanuzzaman, M., Hawrylak-Nowak, B., Islam, T. & Fujita, M. eds. (2022). *Biostimulants for Crop Production and Sustainable Agriculture*. CABI.

Hassan, M. S., Belal, H. E., Abou-Sreea, A. I. B., & Rady, M. M. (2023). Exogenous application of selenium or iodine improves the growth, yield and antioxidant status of *Capsicum annuum* L. Labyrinth: *Fayoum Journal of Science and Interdisciplinary Studies*, *1*(1), 76-83.

Heydari, H., Zarinkamar, F., Rezayian, M., & Soltani, B. M. (2026). The application of selenium enhances salt stress tolerance of sesame plants through regulation of key metabolic responses. *BMC Plant Biology*, *26*(1), 516. https://doi.org/10.1186/s12870-026-08319-x

Hoagland, D. R., & Arnon, D. I. (1950). The water-culture method for growing plants without soil. *Circular. California Agricultural Experiment Station*, 347.

Jiang, C., Zu, C., Lu, D., Zheng, Q., Shen, J., Wang, H. and Li, D. (2017). Effect of exogenous selenium supply on photosynthesis, Na^+ accumulation and antioxidative capacity of maize (*Zea mays* L.) under salinity stress. *Scientific Reports*, *7*(1), 42039. https://doi.org/10.1038/srep42039

Karakas, S., Bolat, I., & Dikilitas, M. (2021). The use of halophytic companion plant (*Portulaca oleracea* L.) on some growth, fruit, and biochemical parameters of strawberry plants under salt stress. *Horticulturae*, *7*(4), 63. https://doi.org/10.3390/horticulturae7040063

Karimi. N. & Saiedikhah, Z. (2018). Effect of selenium on growth and some physiological parameters of *Allium iranicum* Wendelbo. and *Allium ampeloprasum* L. *Plant Process and Function*, *7*(24), 183-198. http://jispp.iut.ac.ir/article-1-282-fa.html (In Persian)

Khalofah, A., Migdadi, H., & El-Harty, E. (2021). Antioxidant enzymatic activities and growth response of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) to exogenous selenium application. *Plants, 10*(4), 719. https://doi.org/10.3390/plants10040719

Khamsezadeh Qazvini, S., Rasouli, M., & Borna, F. (2025). Effect of foliar application of melatonin on some morphological and antioxidant characteristics of peppermint (*Mentha piperita* L.) under salinity stress conditions. *Research in Plant Metabolites, 2*(4), 19-35. https://doi.org/10.22034/jrpsm.2025.511759.1057 (In Persian)

Kiferle, C., Gonzali, S., Beltrami, S., Martinelli, M., Hora, K., Holwerda, H. T., & Perata, P. (2022). Improvement in fruit yield and tolerance to salinity of tomato plants fertigated with micronutrient amounts of iodine. *Scientific Reports, 12*(1), 14655. https://doi.org/10.1038/s41598-022-18301-w

Lee, D. H., Kim, Y. S., & Lee, C. B. (2001). The inductive responses of the antioxidant enzymes by salt stress in the rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Plant Physiology*, *158*(6), 737-745. https://doi.org/10.1078/0176-1617-00174

Macias, J. M., Caltzontzit, M. G. L., Martínez, E. N. R., Ortiz, W. A. N., Benavides Mendoza, A. & Lagunes, P. M. (2021). Enhancement to salt stress tolerance in strawberry plants by iodine products application. *Agronomy, 11*, 602. https://doi.org/10.3390/agronomy11030602

Menzel, C. M. (2019). Temperature has a greater effect on fruit growth than defoliation or fruit thinning in strawberries in the subtropics. *Agriculture, 9*(6), 127. https://doi.org/10.3390/agriculture9060127

Mohebbi, K., Eshghi, S., Shirdel, M., & Rajaei, N. (2024). The effect of root and foliar application of selenium on the growth and yield of 'Queen Eliza' strawberry in hydroponic culture. *Iranian Journal of Horticultural Science, 55*(2), 273-293. https://doi.org/10.22059/ijhs.2024.283573.2101 (In Persian)

Morais, E. G. d., Silva, M. A., Quispe, A. P. V., Machado, G. G. L., Prado, D. T., Benevenute, P. A. N., Lima, J. d. S., de Sousa, G. F., de Barros Vilas Boas, E. V., & Guilherme, L. R. G. (2024). Foliar sprays of multi-nutrient fertilizer containing selenium produce functional tomato fruits with higher shelf life. *Plants, 13*(16), 2288. https://doi.org/10.3390/plants13162288

Mousavi, A. A., Roosta, H. R., Esmaeilizadeh, M., Eshghi, S. (2022). Effects of selenium and silicon on some vegetative and biochemical attributes of cucumber under salinity and alkalinity stresses in hydroponic culture. *Iranian Journal of Horticultural Science and Technology (IJHST), 23*(1), 63-78. http://journal-irshs.ir/article-1-541-fa.html (In Persian)

Mozafariyan, M., Kamelmanesh, M.M. & Hawrylak-Nowak, B. (2016). Ameliorative effect of selenium on tomato plants grown under salinity stress. *Archives of Agronomy and Soil Science*, *62*(10), 1368-1380. https://doi.org/10.1080/03650340.2016.1149816

Munns, R., James, R. A., & Lauchli, A. (2006). Approaches to increasing the salt tolerance of wheat and other cereals. *Journal of Experimental Botany*, *57*(5), 1025-1043. https://doi.org/10.1093/jxb/erj100

Ondrasek, G., Rathod, S., Manohara, K. K., Gireesh, C., Anantha, M. S., Sakhare, A. S., Parmar, B., Yadav, B.K., Bandumula, N., Raihan, F., Zielinska-Chmielewska, A., & Horvatinec, J. (2022). Salt stress in plants and mitigation approaches. *Plants, 11*(6), 717. https://doi.org/10.3390/plants11060717

Parihar, P., Singh, S., Singh, R., Singh, V. P., & Prasad, S. M. (2015). Effect of salinity stress on plants and its tolerance strategies: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, *22*(6), 4056-4075. https://doi.org/10.1007/s11356-014-3739-1

Patino-Cruz, J. J., Ochoa-Chaparro, E. H., Navarro-León, E., Chávez-Mendoza, C., Muñoz-Márquez, E., Guevara-Aguilar, A., Pérez-Álvarez, S., & Sánchez, E. (2025). Comparative effectiveness of iodine nanoparticles and potassium iodide on nitrogen assimilation, biomass, and yield in lettuce. *Nitrogen, 6*(3), 85. https://doi.org/10.3390/nitrogen6030085

Paulus, A., Welch, N., Voth, V., & Bringhurst, R. (1974). Control of Ramularia leafspot of strawberry. *California Agriculture, 28*(6), 5-6.

Pourebrahimi, M., Eshghi, S., Ramezanian, A., & Faghih, S. (2023). Effect of combined application of selenium and hydrogen sulfide under salinity stress on yield, physiological traits and biofortification of strawberries in hydroponic cultivation. *Scientia Horticulturae, 315*, 111982. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.111982

Prom-U-Thai, C., Rashid, A., Ram, H., Zou, C., Guilherme, L.R.G., Corguinha, A.P.B., Guo, S., Kaur, C., Naeem, A., Yamuangmorn, S., & Ashraf, M.Y. (2020). Simultaneous biofortification of rice with zinc, iodine, iron and selenium through foliar treatment of a micronutrient cocktail in five countries. *Frontiers in Plant Science, 11*, 589835. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.589835

Shirdel, M., Eshghi, S., Ramezanian, A., Gharaghani, A., & Etemadi, M. (2026). Mitigating alkaline stress in strawberry: Synergistic effects of melatonin and GABA on membrane integrity, antioxidant activity, and ionic balance. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 26*(1), 4173-4195. https://doi.org/10.1007/s42729-026-03129-4

Talbi, S., Romero-Puertas, M.C., Hernández, A., Terrón, L., Ferchichi, A. & Sandalio, L.M. (2015). Drought tolerance in a Saharian plant Oudneya africana: role of antioxidant defences. *Environmental and Experimental Botany*, *111*, 114-126. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.11.004

Yadav, M., Sharma, R., Dhamija, A., Yashveer, S., & Kumar, S. (2026). Salinity stress and adaptive responses in strawberry: mechanisms, microbial and nano-technological interventions, breeding strategies, and future perspectives. *Plant Cell Biotechnology and Molecular Biology, 27*(7-8), 49–69. https://doi.org/10.56557/pcbmb/2026/v27i7-810686

Yaghubi, K., Vafaee, Y., Ghaderi, N., & Javadi, T. (2019). Potassium silicate improves salinity resistance and affects fruit quality in two strawberry cultivars grown under salt stress. *Communications in Soil Science and Plant Analysis, 50*(12), 1439–1451. https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1621333

Yang, Y., Jia, B., Ma, X., Shang, H. L., Lou, S., Zhang, C., Zhao, J.M., Li, M., Bao, J.L., Wang, Z.B., & Jia, D. J. (2026). Growth characteristics and sustainable cultivation management techniques of small berries: a review with a focus on strawberry under protected agriculture. *Phyton-International Journal of Experimental Botany*, *95*(5), 1. https://doi.org/10.32604/phyton.2026.081047

Yin, H., Qi, Z., Li, M., Ahammed, G. J., Chu, X., Zhou, J. (2019). Selenium forms and methods of application differentially modulate plant growth, photosynthesis, stress tolerance, selenium content and speciation in *Oryza sativa L*. *Ecotoxicol Environ Safety*, *169*, 804 –911. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.11.080

Zahedi, S. M., Abdelrahman, M., Hosseini, M. S., Hoveizeh, N. F., & Tran, L. S. P. (2019). Alleviation of the effect of salinity on growth and yield of strawberry by foliar spray of selenium-nanoparticles. *Environmental Pollution*, *253*, 246-258. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.04.078

Zahedi, S. M., Hosseini, M. S., Abadia, J., & Marjani, M. (2020). Melatonin foliar sprays elicit salinity stress tolerance and enhance fruit yield and quality in strawberry (*Fragaria* × *ananassa* Duch.). *Plant Physiology and Biochemistry*, *149*, 313-323. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.02.021

Iranian Journal of Horticultural Science and Technology 27 (2):157-174 (2026) Under Press
Research article

The Effect of Selenium and Iodine Application on Growth, Yield, and Quality Characteristics of Strawberry (*Fragaria* × *ananassa*) Fruit under Salinity Stress in Hydroponic Cultivation

Saeid Eshghi [1], Sara Jamshidi [1], Sahar Mirzaei [2], Mohsen Shirdel[*1]
1. Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran.
2. Greenhouse & Controlled Environment Research Center, Horticultural Science Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran.
*Corresponding author. mohsenshirdel89@shirazu.ac.ir; mohsenshirdel89@gmail.com

Salinity is a major limiting factor in the production of horticultural products, especially in hydroponic cultivation systems. This study aimed to investigate the effects of selenium (Se) and iodine (I) in mitigating salinity stress damage in strawberry plants of the 'Kurdistan' cultivar. Accordingly, a factorial experiment was conducted in a completely randomized design with two salinity levels (no salinity and 40 mM NaCl) and four fertilizer treatments, including control, Se (1 mg L^{-1} in nutrient solution), I (1 µM as a foliar spray), and combined application of Se and I (Se+I), with four replications at Shiraz University. The results showed that salinity stress reduced growth, yield, and fruit quality parameters, whereas the use of Se and I improved these traits. Under salinity stress, the combined application of Se+I increased shoot fresh weight (34.37 g) and shoot dry weight (9.87 g) by 28% and 14%, respectively, compared to the control. In addition, primary fruit weight (7.30 g), secondary fruit weight (6.50 g), and total yield (36 g) increased under salinity stress, whereas application of Se+I increased them by 46%, 71%, and 39%, respectively, compared to no application. Furthermore, the combined application of Se+I increased total soluble solids (8.82 %), titratable acidity (1.06 %), vitamin C (99.5 mg/100g fresh weight), total phenols (5.76 mg Gallic acid/g), and anthocyanins (92.23 mg ciyanidin-3-glocoside/100g fruit) by 13%, 53%, 27%, 9%, and 41%, respectively, under salt stress compared to no application. The results of this study indicate that the combined application of Se and I can be used as a suitable strategy to increase salt tolerance and improve the growth, yield, and fruit quality traits of strawberries in hydroponic cultivation systems.
Keywords: Abiotic stress, Fresh weight, Leaf area, Primary and secondary fruits, Soilless culture, Total phenol, Total soluble solids.