روابط خاک و گیاه / سال یازدهم / شماره چهارم / زمستان ۱۳۹۹/ صفحات ۶۴-۵۱

مقاله پژوهشی

# اثر نانوذرات سیلیس و جاسمونیک اسید بر برخی ویژگی‌های مورفولوژیک توت‌فرنگی تحت تنش شوری

سامان عثمان پور[۱]، علی اکبر مظفری[۱ و ۲*] و ناصر قادری[۱ و ۲]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۵/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۱۳)

## چکیده

**تنش شوری یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده رشد و عملکرد در گیاهان است. توت‌فرنگی گیاهی چندساله و یکی از محصولات دانه ریز حساس به شوری است. به‌منظور بررسی اثر جاسمونیک اسید و نانوذرات سیلیس بر ویژگی‌های رویشی و عملکرد و برخی ویژگی‌های میوه توت‌فرنگی رقم پاروس، آزمایشی با سه سطح جاسمونیک اسید (صفر، ۰/۲۵ و ۰/۵ میلی‌مولار) به‌صورت محلول‌پاشی، سه سطح نانوذرات سیلیس (صفر، ۱ و ۲ میلی‌مولار) و کلرید سدیم در دو سطح (صفر و ۵۰ میلی‌مولار) به‌صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار به‌صورت کشت بدون خاک در شرایط گلخانه انجام شد. در این پژوهش صفات طول گل‌آذین، حجم ریشه، وزن خشک بخش هوایی و ریشه، درصد روزنه‌های باز، برخی ویژگی‌های میوه (سفتی بافت و شاخص رنگینه شدن)، سطح ویژه برگ و عملکرد بوته اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که شاخص‌های رشدی، عملکرد و برخی ویژگی‌های میوه در این رقم در اثر تنش شوری کاهش یافتند. کاربرد جاسمونیک اسید و نانوذرات سیلیس در شرایط بدون تنش و تنش شوری باعث بهبود ویژگی‌های رویشی گیاه شد. کاربرد جاسمونیک اسید و نانوذرات سیلیس تحت تنش شوری باعث شد که حجم ریشه ۴۹ درصد، وزن خشک طوقه ۱۴۶ درصد و میزان عملکرد ۵۷ درصد افزایش یابد. بهترین نتایج در کاربرد توأم جاسمونیک اسید و نانوذرات سیلیس بر پارامترهای رشدی در تیمار ۵۰ میلی‌مولار جاسمونیک اسید به همراه ۰/۵ میلی‌مولار نانوذرات سیلیس مشاهده شد.**

**واژه‌های کلیدی: پاروس، آب کشت، سیلیکا، گلخانه، تنش**

## مقدمه

یکی از دغدغه‌های مهم در کاهش تولید محصولات کشاورزی، عوامل مختلف تنش‌زای محیطی است (۳). تنش‌های غیرزنده (مانند خشکی، شوری، دمای بسیار زیاد، واکنش محیط، شرایط غرقابی، سمیّت مواد معدنی، فلزات سنگین، اشعه فرابنفش و علف‌کش‌ها) و زنده (آفات و بیماری‌ها) با تأثیر مستقیم و غیرمستقیم باعث محدودیت تولید و کاهش بهره‌وری در کشاورزی می‌شوند. در این میان، شوری یکی از بارزترین عوامل کاهش تولید در کشاورزی محسوب می‌شود (۳۶). حدود ۷ درصد از کل زمین‌های جهان دچار شوری شده‌اند (۲۰)، که ۴۵ میلیون هکتار را شامل می‌شود (۲۴). توت‌فرنگی (*Fragaria × annanasa* Duch.) گیاهی حساس به شوری

۱. گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان

۲. مرکز پژوهشی بهنژادی و بهزراعی توت‌فرنگی، دانشگاه کردستان، سنندج

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: a.mozafari@uok.ac.ir

با آستانه تحمل ۱ dS/m است که در رسانایی الکتریکی (EC) حدود ۲/۲ dS/m، عملکرد توت‌فرنگی تا پنجاه درصد کاهش می‌یابد (۱۹)، که این تحمل، به نوع رقم، نوع محیط کشت و مقدار نمک موجود در محیط بستگی دارد (۲۳). شوری، بر تمامی صفات رویشی در توت‌فرنگی تأثیر منفی می‌گذارد. همچنین، باعث کاهش جذب کلسیم، منیزیم، پتاسیم، آهن و روی می‌شود (۲۶). با افزایش سطح شوری، به همان نسبت، از عملکرد محصول نهایی توت‌فرنگی نیز کاسته می‌شود (۷). سیدلر فاطمی و همکاران (۳۳) به این نتیجه رسیدند که افزایش غلظت کلریدسدیم در محلول غذایی، علاوه بر کاهش رشد و نمو، باعث کاهش سطح برگ، تعداد برگ و وزن تازه و خشک در گیاه توت‌فرنگی می‌شود. یکی از راه‌های مقابله با تنش شوری، کاربرد تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی مانند اسید آبسزیک (Abscisic acid (ABA، سایتوکنین، براسینوئیدها، اسید سالیسیلیک و جاسمونات‌ها است (۱۹). جاسمونیک اسید جزء گروهی جدید از هورمون‌های گیاهی بوده که به‌عنوان واسطه در واکنش‌های دفاعی گیاهی مطرح است (۱۰). پژوهشگران آثار مثبت جاسمونات‌ها را در القای عکس‌العمل گیاه در برابر تنش‌های زنده و غیرزنده بیان کرده‌اند (۳۴). جاسمونات‌ها به‌عنوان پیام‌رسان شیمیایی در هنگام بروز انواع تنش‌ها از جمله صدمات فیزیکی (۱۶)، تابش اشعه ماوراءبنفش (۱۱) و تنش شوری عمل می‌کنند (۳۱).

پژوهشگران گزارش کردنده‌اند که در توت‌فرنگی، وزن تازه و خشک برگ، تعداد برگ، وزن تازه و خشک ریشه تحت تنش شوری کاهش می‌یابد (۱۶). کاهش وزن خشک اندام‌های هوایی و زیرزمینی در توت‌فرنگی رقم سلوا (۲۵) و السانتا و کرونا (۲۳) تحت تنش شوری گزارش شده است. تغییر در تعداد، اندازه و باز و بسته شدن روزنه‌ها یکی از آثار میکروسکوپی حاصل از وقوع تنش شوری در برگ گیاهان است (۳۴).

از طرف دیگر امروزه فناوری نانو در سطح گسترده مورد توجه بیش‌تر پژوهشگران علوم مختلف قرارگرفته است (۱۸). در میان عناصر معدنی پس از اکسیژن، دومین عنصر تشکیل‌دهنده پوسته زمین سیلیسیوم است (۳۴). برخی سیلیسیوم را یک عنصر غیرضروری (۱۴) و عدّه‌ای هم آن را یک عنصر ضروری در تغذیه گیاهی می‌دانند (۲۸). تأثیر سیلیسیوم بر عملکرد گیاه به‌دلیل رسوب در پهنای برگ، افزایش استحکام برگ‌ها و افزایش غلظت کلروفیل در واحد سطح برگ است (۱۶). سیلیسیوم بر مقاومت به تنش‌های طبیعی از جمله تنش شوری اثرگذار است (۳۴). در گیاه گوجه فرنگی افزودن نانوسیلیسیوم باعث افزایش وزن تازه و کارایی فتوسنتز و افزایش کارایی مصرف آب و به‌ویژه کاهش مصرف محلول غذایی در شرایط کشت هیدروپونیک می‌شود (۱۸).

در کشاورزی، محصولات حساس به شوری همانند توت‌فرنگی نیازمند مدیریت دقیق و کنترل همه جانبه است. بنابراین استفاده از قابلیت‌های جاسمونیک اسید و نانوذرات سیلیس در مقابله با تنش شوری می‌تواند به‌عنوان یکی از راه‌حل‌های این مشکل بررسی شود. از این‌رو هدف از پژوهش حاضر بررسی اثر غلظت‌های مختلف جاسمونیک اسید و نانوذرات سیلیس بر صفات موفولوژیک در شرایط تنش شوری بر محصول توت‌فرنگی رقم پاروس بود.

## مواد و روش‌ها

برای انجام این پژوهش از روش آماری فاکتوریل، در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۳ تکرار و ۱۸ تیمار استفاده شد. هر تیمار شامل ۴ واحد آزمایشی (گلدان) بود. با استفاده از نرم‌افزار The Hat (v.3) چیدمان واحدهای آزمایشی به‌صورت تصادفی انجام گرفت. فاکتورهای آزمایشی شامل: فاکتور شوری در دو سطح صفر و ۵۰ میلی‌مولار، فاکتور نانوذرات سیلیس در سه سطح صفر، ۱و ۲ میلی‌مولار و فاکتور جاسمونیک اسید در سه سطح صفر، ۰/۲۵ و ۰/۵ میلی‌مولار بودند.

در این پژوهش از نشاءهای توت‌فرنگی رقم پاروس به‌عنوان مواد آزمایشی استفاده شد. نشاءهای تهیه‌شده از گلخانه‌های دانشکده کشاورزی دانشگاه کردستان پس از هرس

**جدول ۱.** غلظت (CN)، فرمول شیمیایی (CF) و نام عناصر (HNS) محلول غذایی هوگلند.

**Table 1.** Concentration (CN), chemical formula (CF), and the elements (HNS) used in the Hoagland nutrient solution.

| CN(mg $L^{-1}$) | CF | HNS | |
|---|---|---|---|
| 178.50 | $NH_4NO_3$ | Nitrogen (N) | Macroelements |
| 107.25 | $(NH_4)_2PO_4$ | (P) Phosphoru | |
| 128.57 | $KNO_3$ | Potassium (K) | |
| 221.25 | $Ca(NO_3)_2$ | Calcium (Ca) | |
| 148.50 | $MgSO_4$ | Magnesium (Mg) | |
| 16.62 | $H_3BO_3$ | Bromine (B) | Microelements |
| 7.87 | $CuSO_4$ | Copper (Cu) | |
| 13.12 | $ZnSO_4$ | Zinc (Zn) | |
| 11.55 | $Mn_2SO_4$ | Manganese (Mn) | |
| 6.00 | $FeSO_4$ | Iron (Fe) | |

ریشه و برگ در گلدان‌های ۵ لیتری حاوی ۵۰ درصد کوکوپیت + ۵۰ درصد پرلایت کشت شدند. ابتدا نشاءها برای ریشه‌زایی و آغاز رشد جدید به‌مدت دو هفته در گلخانه در دمای ۱۸ تا ۲۲ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۸۰ تا ۸۵ درصد نگهداری شدند. پس از استقرار بوته‌ها، محلول غذایی هوگلند (جدول ۱) به گلدان‌ها افزوده شد. در ابتدا به هر گلدان ۱۰۰ میلی‌لیتر محلول غذایی داده شد و با رشد رویشی گیاهچه‌ها مقدار محلول غذایی به تناسب رشد (هر هفته ۵ میلی‌لیتر) افزایش یافت. این عمل تا ۵ ماه یعنی زمانی که گیاه به رشد کامل رسید ادامه یافت. از آن پس تا پایان آزمایش هر ۲ روز یک بار به هر گلدان ۲۰۰ میلی‌لیتر محلول غذایی داده شد.

برای تنظیم pH محلول غذایی از اسیدسولفوریک ($H_2SO_4$) استفاده شد و pH محلول توسط دستگاه pH متر در دامنه ۵/۸ تا ۶/۵ تنظیم شد. اعمال تیمارها و اندازه‌گیری صفات ۱۵ ماه پس از کشت گیاهچه‌ها آغاز شد. همزمان با شروع تیمار شوری، اعمال تیمارهای جاسمونیک اسید و نانوذرات سیلیس نیز شروع شد. جاسمونیک اسید به‌صورت محلول‌پاشی برگی هر دو هفته یک بار و نانوذرات سیلیس به‌صورت مخلوط در محلول غذایی و به‌صورت یک روز در میان در اختیار گیاهان قرار گرفتند. مدت زمان تیماردهی (طول مدت آزمایش) ۶۰ روز در نظر گرفته شد و پس از اتمام تیماردهی گیاهان (دو ساله) در اوایل اردیبهشت ماه اندازه‌گیری صفات مورد نظر آغاز شدند.

**تهیه نانوذرات سیلیس**

نانوذارات سیلیس مورد استفاده از روش ترکیب تترا اتوکسی سیلان در محیط اسیدی پلیمریزه شده سنتز شده و به‌صورت محلول کلوئیدی ۱۰ گرم در لیتر در حجم ۱۰۰۰ میلی‌لیتر تهیه شد (۵).

**اندازه‌گیری ویژگی‌های زراعی و عملکرد میوه**

در این پژوهش ویژگی طول گل‌آذین، حجم ریشه در بوته، وزن خشک بخش هوایی و ریشه، درصد روزنه‌های باز روی سطح برگ، سطح ویژه برگ، سفتی بافت میوه، شاخص رنگینه شدن میوه و عملکرد بوته اندازه‌گیری شدند.

برای بررسی ویژگی‌های رویشی، پیش از خارج‌کردن گیاهان از گلدان، طول گل‌آذین با خط‌کش فلزی با دقت ۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. محاسبه حجم ریشه براساس قانون ارشمیدس و با کمک استوانه مدرج حاوی مقدار مشخصی آب و تعیین تغییر حجم آب پس از قرار دادن ریشه‌ها انجام شد (۳۸). برای تعیین وزن خشک، مواد گیاهی در داخل پاکت قرار داده و به‌مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۷۰ درجه سلسیوس قرار داده شد و سپس وزن خشک با ترازوی دیجیتال اندازه-گیری شد (۳۸). سطح ویژه برگ (۹) و شاخص تحمل به شوری یا STI (۳۹) به‌ترتیب از روابط (۱) و (۲) محاسبه شدند:

[۱] وزن خشک/ سطح برگ = سطح ویژه برگ

[۲] وزن خشک کل اندام‌های تحت تیمار) =% STI

۱۰۰× (وزن خشک کل اندام‌های شاهد /

برای تعیین تعداد روزنه‌های باز و بسته روی سطح برگ از برگ‌های بالغ و جوان که هنوز روی بوته قرار داشتند استفاده شد (۱۸). نمونه‌های آماده روی لام قرار داده شدند و سپس با استفاده از دستگاه میکروسکوپ (OLYMPUS BX51 Japan) نمونه‌ها با بزرگ‌نمایی ۶۰۰ و ۱۰۰۰ توسط نرم‌افزار (Cellsens Standard) عکس‌برداری شدند. شمارش تعداد روزنه‌ها در سطح معین‌شده با نرم‌افزار (ImageJ 1.44p) انجام شد.

### اندازه‌گیری ویژگی‌های کمّی و کیفی میوه

برای مشخص‌نمودن اثر تیمارها، از هر تکرار تعداد ۱۲ عدد میوه انتخاب شده و ویژگی‌های مورفولوژیک مورد نظر اندازه‌گیری شدند.

### اندازه‌گیری عملکرد

میوه‌های تمامی واحدهای آزمایشی در هر تکرار با ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ توزین شده و میانگین آن‌ها به‌عنوان عملکرد نهایی هر بوته در نظر گرفته شد.

### اندازه‌گیری میزان رنگینه‌شدن میوه‌ها

میزان رنگینه‌شدن میوه‌ها با استفاده از دستگاه رنگ‌سنج ( TES 135A Taiwan) اندازه‌گیری شد و مقادیر $a^*$ و $b^*$ ثبت شد. مقدار کروما (Chroma = C) و زاویه هیو (hue°= h) براساس استاندارد (۱۸) با توجه به فرمول‌های زیر محاسبه شدند:

$$h° = \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \qquad [۳]$$

و

$$C = \left[(a^*)^2 + (b^*)^2\right]^{\frac{1}{2}} \qquad [۴]$$

$a^*$ مقیاسی برای محدوده رنگ سبز تا رنگ قرمز و $b^*$ شاخصی برای مرز بین رنگ زرد تا آبی در نظر گرفته شده است (۱۵).

### اندازه‌گیری سفتی بافت میوه

برای اندازه‌گیری سفتی بافت، تعداد ۶ میوه زیر دستگاه فشارسنج (Santam STM-1 Iran) با پروب ۸ میلی‌متر و سرعت ۲۰ میلی‌متر بر ثانیه قرار داده شد و در نهایت میانگین آن‌ها بر حسب واحد نیوتن بر سانتی‌متر مربع ($N/cm^2$) ثبت شد.

### تیمارهای آزمایشی و تجزیه آماری داده‌ها

برای تجزیه و تحلیل آماری از نرم افزار MSTATC-C، مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون LSD و برای رسم نمودار از نرم‌افزار Excel 2013 استفاده شد.

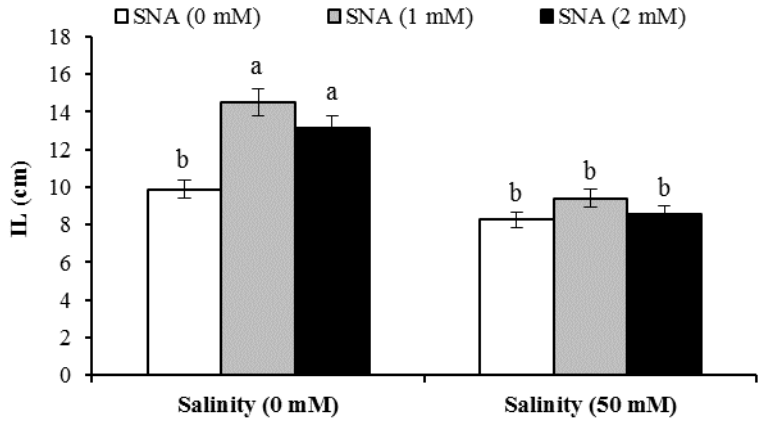
## نتایج

### طول گل‌آذین

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر ساده شوری و نانوذرات سیلیس و برهم‌کنش آن‌ها بر طول گل‌آذین معنی‌دار ($p < ٪۵$) بود. بیش‌ترین طول گل‌آذین مربوط به تیمارهای ۱ و ۲ میلی‌مولار نانوذرات سیلیس در شرایط بدون تنش شوری بود. تنش شوری نسبت به شاهد (صفر میلی‌مولار شوری) باعث کاهش معنی‌دار طول گل‌آذین نشد، درحالی که تیمارهای ۱ و ۲ میلی‌مولار نانو سیلیس به‌ترتیب ۴۳ درصد و ۳۵ درصد طول گل‌آذین را در شرایط بدون تنش نسبت به شرایط تنش شوری افزایش دادند (شکل ۱).

### حجم ریشه

جاسمونیک اسید و نانو ذرات سیلیس بر حجم ریشه در بوته تأثیر معنی‌داری ($p < ٪۱$) داشتند. بر اساس نتایج، بیش‌ترین حجم ریشه در بوته در تیمار ۲ میلی‌مولار نانوذرات سیلیس و سطح صفر جاسمونیک اسید و شرایط بدون تنش شوری با میانگین ۸۶/۴۳ سانتی‌متر مکعب به‌دست آمد. در شرایط بدون تنش با افزایش غلظت جاسمونیک اسید تأثیر نانوذرات سیلیس بر رشد ریشه کاهش یافت، درحالی که در شرایط تنش شوری در غلظت ۰/۵ میلی‌مولار جاسمونیک اسید با افزایش غلظت نانوذرات سیلیس حجم ریشه در بوته به میزان ۴۹ درصد افزایش یافت (جدول ۲).




**شکل ۱.** مقایسه میانگین‌های اثر برهم‌کنش تنش شوری (SS) و نانوذرات سیلیس (SNA) بر طول گل‌آذین (IL) توت‌فرنگی رقم پاروس؛ ستون‌های دارای حرف مشترک در سطح ۵ درصد آزمون LSD اختلاف معنی‌دار ندارند.

**Fig. 1.** Means comparison of the interaction effect of salinity stress (SS) and silica nanoparticles (SNA) on the inflorescence length (IL) of strawberry cv. Parus; Columns with similar letters are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

**جدول ۲.** مقایسه میانگین‌های حجم ریشه در بوته (RV)، سطح ویژه برگ (SLA)، روزنه‌های سطح برگ (LSS) و وزن خشک برگ (LDW) توت‌فرنگی رقم پاروس تحت تأثیر جاسمونیک اسید (JA) و نانوذرات سیلیس (SNA) تحت تنش شوری (SS)

**Table 2.** Means comparison of root volume (RV), specific leaf area (SLA), leaf surface stomata (LSS) and leaf dry weight (LDW) of strawberry cv. Parus as affected by jasmonic acid (JA) and silica nanoparticles (SNA) in response to salinity stress (SS)

| SS (mM) | JA (mM) | SNA (mM) | LDW (g/plant) | LSS (%) | SLA ($cm^2/g$) | RV ($cm^3$/plant) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0.00 | 0 | $7.7^{bc}$ | $71.4^{f}$ | $0.8^{efg}$ | $62.7^{bc}$ |
| | | 1 | $8.6^{a}$ | $73.9^{e}$ | $0.6^{fi}$ | $65.3^{bc}$ |
| | | 2 | $8.8^{a}$ | $75.5^{cd}$ | $0.7^{fi}$ | $86.4^{a}$ |
| | 0.25 | 0 | $5.9^{de}$ | $74.0^{de}$ | $0.8^{efg}$ | $35.2^{g}$ |
| | | 1 | $6.0^{de}$ | $76.6^{bc}$ | $1.1^{c}$ | $24.4^{h}$ |
| | | 2 | $6.5^{d}$ | $70.0^{de}$ | $0.7^{fh}$ | $67.2^{b}$ |
| | 0.50 | 0 | $7.4^{c}$ | $78.2^{ab}$ | $1.0^{cd}$ | $46.7^{ef}$ |
| | | 1 | $8.4^{ab}$ | $73.2^{e}$ | $0.8^{df}$ | $48.7^{e}$ |
| | | 2 | $7.7^{bc}$ | $78.4^{a}$ | $0.6^{ig}$ | $52.3^{de}$ |
| 50 | 0.00 | 0 | $4.5f^{g}$ | $50.7^{k}$ | $1.3^{b}$ | $35.8^{g}$ |
| | | 1 | $6.3^{d}$ | $57.2^{hi}$ | $1.8^{a}$ | $65.2^{bc}$ |
| | | 2 | $5.8^{de}$ | $59.0^{g}$ | $1.8^{a}$ | $52.0^{de}$ |
| | 0.25 | 0 | $3.4^{h}$ | $55.8^{ij}$ | $1.4^{b}$ | $38.0^{g}$ |
| | | 1 | $5.3^{ef}$ | $54.7^{j}$ | $0.9^{ce}$ | $50.4^{e}$ |
| | | 2 | $3.3^{h}$ | $55.6^{j}$ | $0.6^{hi}$ | $35.2^{g}$ |
| | 0.50 | 0 | $3.9^{gh}$ | $55.7^{gh}$ | $0.8^{efj}$ | $41.2^{gf}$ |
| | | 1 | $3.6^{h}$ | $50.3^{k}$ | $0.5^{i}$ | $46.3^{ef}$ |
| | | 2 | $5.0^{f}$ | $57.2^{hj}$ | $0.7^{fi}$ | $58.7^{cd}$ |

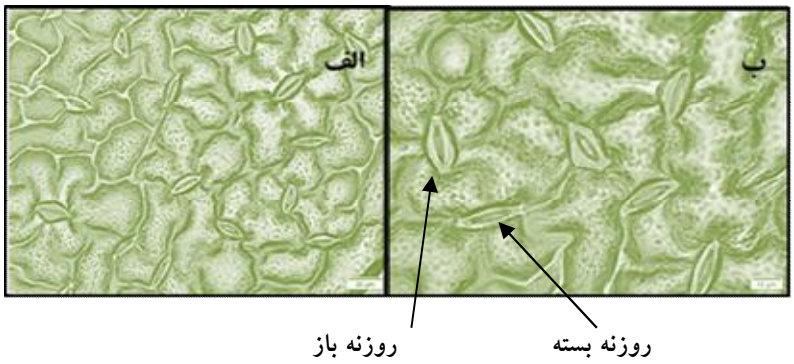
در هر ستون میانگین‌های با حداقل یک حرف مشترک، اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد بر اساس آزمون LSD ندارند.

In each column, means with the same letters are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

## سطح ویژه برگ

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که به استثناء برهم‌کنش شوری و نانوذرات سیلیس، سایر تیمارها بر سطح ویژه برگ اثر معنی‌داری (٪۵ > $p$) داشتند.

بر اساس نتایج، بیش‌ترین سطح ویژه برگ مربوط به تیمار تنش شوری به همراه ۱ و ۲ میلی‌مولار نانوذرات سیلیس و




**شکل ۲.** اثر ۰/۵ میلی‌مولار جاسمونیک اسید به همراه ۲ میلی‌مولار نانوذرات سیلیس بر درصد روزنه‌های باز سطح برگ بالغ جوان توت‌فرنگی رقم پاروس تحت تنش شوری: الف) بزرگ‌نمایی ۶۰۰، و ب) بزرگ‌نمایی ۱۰۰۰

**Fig. 2.** Effect of 0.5 mM jasmonic acid (JA) with 2 mM silica nanoparticles (SNA) on the percentage of the open stoma of the young mature leaf surface of strawberry cv. Parus in response to salinity stress (SS): A) 600×, and B) × 1000

بدون حضور جاسمونیک اسید به‌ترتیب ۱/۸۴ و ۱/۸۱ $cm^2/g$ بود. در حضور جاسمونیک اسید در شرایط تنش شوری، با افزایش غلظت نانوذرات سیلیس سطح ویژه برگ ۳۷ درصد کاهش یافت، درحالی که تأثیر نانوذرات سیلیس از روند مشخصی برخوردار نبود (جدول ۲).

### درصد روزنه‌های باز سطح برگ

تمامی تیمارها بر درصد روزنه‌های باز در سطح برگ تأثیر معنی‌داری (۱٪ > $p$) داشتند. بر اساس نتایج آزمایش حاضر، جاسمونیک اسید و نانوذرات سیلیس در شرایط تنش شوری نسبت به شرایط بدون تنش شوری، سبب کاهش معنی‌دار روزنه‌های باز شدند. جاسمونیک اسید و نانو ذرات سیلیس هر کدام به‌تنهایی در هر دو شرایط تنش و بدون تنش شوری سبب افزایش تعداد روزنه‌های باز شدند. تعداد روزنه‌های باز روی سطح برگ در شرایط تنش شوری در تمام تیمارها کم‌تر از شرایط بدون تنش بود. جاسمونیک اسید به‌همراه نانوذرات سیلیس در تیمار تنش شوری اثر معنی‌داری بر درصد روزنه‌های باز داشت (جدول ۲ و شکل ۲).

### وزن خشک برگ

نتایج تجزیه واریانس داده‌های آزمایش نشان داد که به‌جز نانوذرات سیلیس در شرایط تنش شوری بقیه تیمارها بر وزن خشک برگ تأثیر معنی‌داری (۱٪ ≥p) داشتند.

بررسی اثر تیمارهای آزمایش (جدول ۲) نشان داد بیش‌ترین وزن خشک برگ به‌طور مشترک مربوط به تیمارهای ۱ و ۲ میلی‌مولار نانوذرات سیلیس در سطوح صفر جاسمونیک اسید و صفر شوری به‌ترتیب با میانگین‌های ۸/۵۶ و ۸/۷۶ گرم در بوته و نیز ۰/۵ میلی‌مولار جاسمونیک اسید به همراه ۱ میلی‌مولار نانوذرات سیلیس در شرایط بدون تنش شوری با میانگین ۸/۴۰ گرم در بوته به‌دست آمد (جدول ۲).

### وزن خشک طوقه

وزن خشک طوقه به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر تمام تیمارها قرار گرفتند. کم‌ترین وزن خشک طوقه مربوط تیمار ۲ میلی‌مولار نانوذرات سیلیس در شرایط تنش شوری بود. بیش‌ترین وزن خشک طوقه در تیمار صفر و ۱ میلی‌مولار نانوذرات سیلیس در سطح صفر شوری مشاهده شد (جدول ۳). جاسمونیک اسید در غلظت ۰/۵ میلی‌مولار به همراه ۲ میلی-مولار نانوذرات سیلیس در شرایط تنش شوری سبب افزایش معنی‌دار (۱٪ > $p$) وزن خشک طوقه شد. تیمار ۲ میلی‌مولار نانوذرات سیلیس توانست اثر تنش شوری را تعدیل کند و هم سطح با شرایط بدون تنش شوری شود (جدول ۳).

**جدول ۳.** مقایسه میانگین‌های وزن خشک طوقه (CDM)، وزن خشک ریشه (RDW)، سفتی بافت میوه (FTF)، شاخص رنگینه‌شدن میوه (FCI) توت‌فرنگی رقم پاروس تحت تأثیر جاسمونیک اسید (JA) و نانوذرات سیلیس (SNA) تحت تنش شوری (SS)

**Table 3.** Means comparison for the crown dry mass (CDM), root dry weight (RDW), fruit tissue firmness (FTF) and fruit color index (FCI) of strawberry cv. Parus as affected by jasmonic acid (JA) and silica nanoparticles (SNA) in response to salinity stress (SS)

| SS (mM) | JA (mM) | SNA (mM) | FCI (Hue°) | FCI (Chroma) | FTF ($N/cm^2$) | RDW (g/plant) | CDM (g/plant) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0.00 | 0 | $0.5^{cdf}$ | $58.2^{a}$ | $4.7^{def}$ | $13.5^{b}$ | $4.1^{a}$ |
| | | 1 | $0.5^{ab}$ | $55.3^{cde}$ | $11.2^{a}$ | $9.3^{def}$ | $3.9^{a}$ |
| | | 2 | $0.4^{g}$ | $55.3^{cde}$ | $9.1^{b}$ | $10.9^{b-e}$ | $2.3^{i}$ |
| | 0.25 | 0 | $0.4^{def}$ | $55.9^{bcd}$ | $6.6^{c}$ | $18.0^{a}$ | $3.2^{c}$ |
| | | 1 | $0.4^{ef}$ | $53.3^{e}$ | $6.3^{cd}$ | $10.2^{cdf}$ | $2.2^{i}$ |
| | | 2 | $0.5^{a}$ | $54.1^{de}$ | $10.6^{ab}$ | $11.4^{bcd}$ | $2.5^{hi}$ |
| | 0.50 | 0 | $0.4^{f}$ | $49.4^{f}$ | $6.2^{cde}$ | $9.0^{def}$ | $3.0^{cde}$ |
| | | 1 | $0.5^{b-e}$ | $51.0^{f}$ | $5.7^{cde}$ | $5.2^{gh}$ | $2.6^{fgh}$ |
| | | 2 | $0.5^{ab}$ | $57.8^{ab}$ | $9.1^{b}$ | $19.9^{a}$ | $3.6^{b}$ |
| 50 | 0.00 | 0 | $o.5^{b-e}$ | $50.9^{f}$ | $3.5^{f}$ | $1.5^{i}$ | $22.5^{hi}$ |
| | | 1 | $0.5^{a-d}$ | $58.9^{a}$ | $5.2^{cde}$ | $9.8^{def}$ | $2.9^{def}$ |
| | | 2 | $0.5^{a-e}$ | $57.4^{abc}$ | $6.4^{c}$ | $8.3^{ef}$ | $1.7^{j}$ |
| | 0.25 | 0 | $0.4^{f}$ | $49.0^{f}$ | $5.7^{cde}$ | $7.7^{fg}$ | $2.4^{hi}$ |
| | | 1 | $0.5^{a-e}$ | $58.6^{a}$ | $6.4^{c}$ | $5.0^{gh}$ | $2.8^{efg}$ |
| | | 2 | $0.5^{c-f}$ | $54.1^{de}$ | $4.6^{ef}$ | $4.0^{hi}$ | $2.4^{hi}$ |
| | 0.50 | 0 | $0.4^{f}$ | $50.3^{f}$ | $5.4^{cde}$ | $12.9^{b}$ | $3.2^{cd}$ |
| | | 1 | $0.4^{def}$ | $53.7^{de}$ | $5.2^{cde}$ | $4.7^{h}$ | $2.5^{ij}$ |
| | | 2 | $0.5^{abc}$ | $55.8^{bcd}$ | $5.4^{cde}$ | $12.7^{bc}$ | $3.6^{b}$ |

در هر ستون میانگین‌های با حداقل یک حرف مشترک، اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد بر اساس آزمون LSD ندارد.

In each column, means with the same letters are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

### وزن خشک ریشه

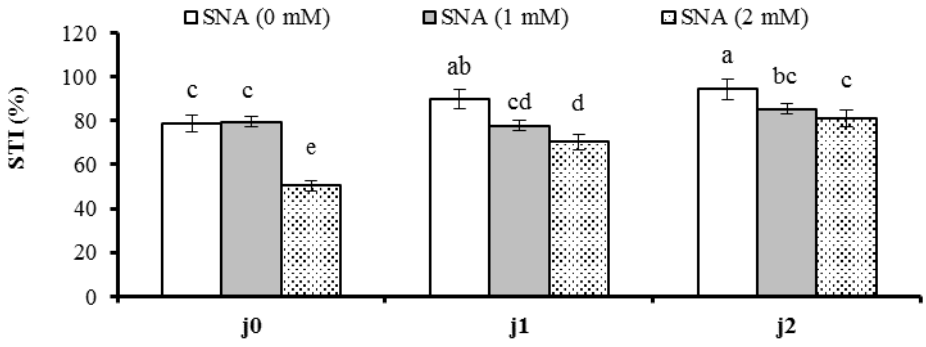
نتایج داده‌ها نشان داد که اثر تمامی تیمارها بر وزن خشک ریشه، معنی‌دار (٪۱ > $p$) بود. براساس این نتایج، کم‌ترین وزن خشک ریشه مربوط به تیمار تنش شوری و بدون حضور جاسمونیک اسید و نانوذرات سیلیس با میانگین ۱/۵ گرم در بوته بود (جدول ۳). نتایج نشان‌دهنده کاهش ۹ برابری (۸۹۷/۳ درصد) وزن خشک ریشه در تنش شوری نسبت به عدم وجود تنش بود. در شرایط تنش شوری غلظت ۰/۵ میلی‌مولار جاسمونیک اسید به تنهایی توانست ۹۸ درصد کاهش وزن خشک ریشه را جبران کند. همچنین غلظت ۰/۵ میلی‌مولار جاسمونیک اسید به همراه ۲ میلی‌مولار نانوذرات سیلیس ۹۷ درصد وزن خشک ریشه در شرایط تنش شوری را افزایش دهد. در شرایط بدون تنش شوری، جاسمونیک اسید در غلظت ۰/۲۵ میلی‌مولار باعث افزایش و در غلظت ۰/۵ میلی‌مولار آن، سبب کاهش وزن خشک ریشه شد (جدول ۳).

### سفتی بافت میوه

بر اساس نتایج تجزیه واریانس، تمامی تیمارها به جز اثر ساده جاسمونیک اسید و برهم‌کنش شوری با جاسمونیک اسید بر سفتی بافت میوه معنی‌دار (٪۱ > $p$) بودند. بیش‌ترین سفتی بافت میوه در شرایط بدون تنش شوری و مربوط به تیمار ۱ میلی‌مولار نانوذرات سیلیس (۱۱/۲۳ $N/cm^2$) و نیز تیمار ۲ میلی‌مولار نانوذرات سیلیس به همراه ۰/۲۵ میلی‌مولار جاسمونیک اسید (۱۰/۵۵ $N/cm^2$) بود (جدول ۳). تنش شوری سبب کاهش سفتی بافت میوه شد، اما جاسمونیک اسید و نانوذرات سیلیس توانستند به‌طور معنی‌داری آثار تنش شوری را تعدیل کنند. کم‌ترین سفتی بافت میوه در تیمار شاهد در هر دو شرایط تنش و بدون تنش شوری مشاهده شد (جدول ۳).

### شاخص رنگینه‌شدن میوه (Chroma)

مقایسه میانگین‌های شاخص رنگینه‌شدن میوه (Chroma) نشان




**شکل ۳.** مقایسه میانگین‌های اثر برهم‌کنش جاسمونیک اسید (JA) و نانوذرات سیلیس (SNA) بر شاخص تحمل به شوری (STI) در توت‌فرنگی رقم پاروس تحت تنش شوری (SS)، $j_0$ (جاسمونیک اسید صفر میلی‌مولار)، $j_1$ (جاسمونیک اسید ۰/۲۵ میلی‌مولار)، $j_2$ (جاسمونیک اسید ۰/۵ میلی‌مولار)؛ ستون‌های دارای حرف مشترک در سطح ۵ درصد بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌دار ندارند.

**Fig. 3.** Means comparison of the interaction effect of jasmonic acid (JA) and silica nanoparticles (SNA) levels on the salinity tolerance index (STI) in strawberry cv. Parous in response to salinity stress (SS), j0 (0 mM jasmonic acid), j1 (0.25 mM jasmonic acid), j2 (0.5 mM jasmonic acid); Columns with the same letters are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

داد که بیش‌ترین مقدار شاخص رنگینه‌شدن میوه (Chroma) در تیمار شاهد و تیمار ۲ میلی‌مولار نانوذرات سیلیس به همراه ۰/۵ میلی‌مولار جاسمونیک اسید در شرایط بدون تنش مشاهده شد، اما در شرایط تنش شوری، بیش‌ترین مقدار این شاخص در تیمار ۱ میلی‌مولار نانو ذرات سیلیس و تیمار ۰/۲۵ میلی‌مولار جاسمونیک اسید به همراه ۱ میلی‌مولار نانوذرات سیلیس مشاهده شد (جدول ۳). تحت هر دو شرایط تنش و بدون تنش شوری در تیمار ۰/۵ میلی‌مولار جاسمونیک اسید با افزایش غلظت نانوذرات سیلیس میزان رنگینه‌شدن (Chroma) نیز افزایش یافت (جدول ۳).

### شاخص رنگینه‌شدن میوه (Hue[a])

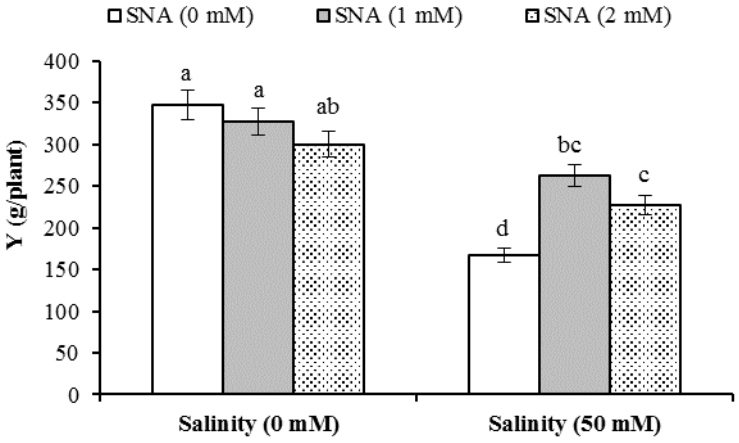
کم‌ترین شاخص رنگینه‌شدن میوه (Hue[a]) مربوط به تیمار ۲ میلی‌مولار نانوذرات سیلیس بود. تحت هر دو شرایط تنش و بدون تنش شوری با افزایش غلظت جاسمونیک اسید میزان رنگینه شدن میوه (Hue[a]) کاهش یافت. در تیمار ۰/۵ میلی‌مولار جاسمونیک اسید تحت هر دو شرایط تنش و بدون تنش شوری با افزایش غلظت نانوذرات سیلیس میزان رنگینه‌شدن میوه (Hue[a]) نیز افزایش یافت (جدول ۳).

### شاخص تحمل به شوری

نتایج نشان داد که اثر همه تیمارها بر شاخص تحمل به شوری معنی‌دار ($p < ٪۱$) بود. براساس این نتایج، افزایش غلظت جاسمونیک اسید از صفر تا ۰/۵ میلی‌مولار سبب افزایش تحمل به شوری شد. غلظت‌های ۰/۲۵ و ۰/۵ میلی‌مولار جاسمونیک اسید تفاوتی از نظر ایجاد تحمل به شوری با هم نداشتند. تیمار نانوذرات سیلیس به تنهایی و در ترکیب با جاسمونیک اسید میزان تحمل به شوری را کاهش داد، بدین معنی که افزایش غلظت نانوذرات سیلیس سبب کاهش تحمل به شوری در گیاه توت فرنگی شد (شکل ۳).

### عملکرد بوته (مقدار کل میوه)

بر اساس نتایج بدست‌آمده، تأثیر شوری و برهم‌کنش شوری با نانوذرات سیلیس بر عملکرد نهایی بوته معنی‌دار ($p < ٪۱$) بودند اما آثار برهم‌کنش سه‌گانه معنی‌دار نشدند. تیمار شوری، سبب کاهش معنی‌دار عملکرد میوه توت‌فرنگی در مقایسه با شرایط بدون تنش شد. در شرایط بدون تنش شوری، نانوذرات سیلیس تأثیر معنی‌داری بر عملکرد نداشت، اما در شرایط تنش شوری نانوذرات سیلیس باعث افزایش معنی‌دار عملکرد نهایی بوته شد (شکل ۴).




**شکل ۴.** مقایسه میانگین‌های اثر برهم‌کنش شوری (S) و نانوذرات سیلیس (SNA) بر عملکرد بوته (Y) در توت‌فرنگی رقم پاروس؛ ستون‌های دارای حرف مشترک در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

**Fig. 4.** Means comparison of the interaction effect of salinity (S) and silica nanoparticles (SNA) on the plant yield (Y) of strawberry cv. Paros; Columns with the same letters are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

**بحث**

کاهش رشد در شرایط تنش شوری به‌دلیل وجود انواع تنش‌های اسمزی یا یونی است (۱۱). گزارش شده است که رشد اندام‌های زایشی توت‌فرنگی در اثر شوری کاهش می‌یابد (۱۶). همسو با نتایج دیگر پژوهشگران، در پژوهش حاضر طول گل آذین تحت تأثیر شوری قرار گرفت و به‌طور معنی‌داری کاهش یافت.

تحت شرایط تنش شوری، به‌دلیل وجود یون‌های سدیم و کلر و کند شدن سنتز دیواره سلولی، حجم ریشه رو به کاهش می‌رود (۶). کاهش طول و حجم ریشه در بوته توت‌فرنگی به احتمال زیاد در نتیجه کاهش رشد اندام‌های هوایی و کاهش فتوسنتز در اثر تنش شوری است. در پژوهش حاضر تنش شوری کاهش معنی‌داری در رشد ریشه توت‌فرنگی رقم پاروس ایجاد کرد. به‌دلیل سمّیت ناشی از تجمع نمک در بافت‌ها و عدم جذب آب توسط ریشه، رشد ریشه کاهش و در نهایت متوقف می‌شود (۲). علاوه بر این افزایش تولید اتیلن و کاهش هورمون ایندول استیک اسید در ریشه نیز باعث کاهش رشد ریشه گیاه در شرایط تنش شوری می‌شود (۳). کاربرد تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی از جمله جاسمونات‌ها برای مقابله با تنش شوری پیشنهاد شده است (۱۹). به‌نظر می‌رسد که جاسمونات‌ها برای مقابله با تنش شوری وظیفه پیام‌رسانی در گیاهان را برای تحمل تنش بر عهده دارند. تنش‌هایی مانند شوری (۱۳)، خشکی و تنش اسمزی (۱۱) باعث القای پیام‌رسانی جاسمونیک‌اسید در گیاهان شوند.

تنش شوری سبب کاهش تعداد و اندازه سلول‌های مزوفیل شده و در نتیجه کاهش سطح برگ می‌شود (۱۶). به‌دلیل ایجاد سمّیت ناشی از حضور یون‌های سدیم و کلر در برگ، کاهش تعداد و سطح برگ تشدید می‌شود. با افزایش شوری سطح برگ کاهش اما بر ضخامت آن افزوده می‌شود (۲۳). در پژوهش حاضر تحت شرایط تنش شوری نانوذرات سیلیس باعث افزایش سطح ویژه برگ شد. با افزایش شوری، سلول‌های اپیدرم مزوفیل، آب بیش‌تری در خود جمع کرده، آب‌دار و گوشتی می‌شوند که همین امر باعث افزایش ضخامت برگ می‌شود. طول و قطر سلول‌های نردبانی و قطر سلول‌های اسفنجی نیز در شرایط تنش شوری افزایش می‌یابند (۱ و ۱۰). برخلاف نتایج به‌دست آمده از این پژوهش، سیدلر فاطمی و همکاران (۳۳) گزارش کرده‌اند که سیلیسیوم تحت شرایط شوری تا حدی سطح ویژه برگ را در توت‌فرنگی رقم سلوا کاهش می‌دهد. اختلاف نتایج ممکن است به‌دلیل استفاده از نانوذرات سیلیس به‌جای سیلیس در این پژوهش است که می‌توانند نتایج متفاوتی به همراه داشته باشند.

ورود و خروج پتاسیم از سلول‌های محافظ روزنه، نقش

مهمی در باز و بسته شدن روزنه‌ها در گیاهان دارد. در این پژوهش نانوذرات سیلیس باعث کاهش درصد روزنه‌های بازشده در واحد سطح برگ شد. جاسمونیک اسید بر ژن‌هایی که آبسیزیک اسید را کد می‌کند تأثیر می‌گذارد و این ماده یک حالت هم‌افزایی با آبسیزیک اسید دارد (۳۰). در پژوهش حاضر تیمار جاسمونیک اسید به همراه نانوذرات سیلیس در شرایط تنش شوری بر بسته‌شدن روزنه‌ها برای مقابله با تنش شوری مؤثر بودند. تنش شوری باعث تغییرات شدید در ویژگی‌های رویشی گیاه و کاهش رشد توت‌فرنگی می‌شود (۳۷). تحت تنش شوری، کاهش رشد اندام‌های هوایی به‌دلیل افزایش فعالیت هورمون آبسزیک اسید یا کاهش تولید و انتقال سیتوکینین از ریشه به ساقه است که میزان ماده خشک کل گیاه را در اثر کاربرد آن کاهش می‌دهد (۲).

کلرید سدیم موجود در محیط کشت، رشد رویشی و زایشی گیاهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد و موجب کاهش وزن خشک آن‌ها می‌شود (۲۲). تحت تنش شوری به‌دلیل تجمع مواد غذایی در بافت‌هایی که فعالیت فتوسنتزی دارند ریشه‌ها دچار محدودیت می‌شوند، زیرا انتقال مواد غذایی به‌سمت ریشه کند یا متوقف می‌شود (۴۰). در محیط‌های حاوی کلرید سدیم، سیستم ریشه مقادیر فراوانی از مواد غذایی را به‌خاطر افزایش مقاومت در برابر تنش شوری و افزایش سرعت تنفس مصرف می‌کند؛ در نتیجه توزیع مواد غذایی کم می‌شود و رشد سیستم ریشه کاهش می‌یابد (۲۷). در این پژوهش غلظت ۲ میلی‌مولار نانوسیلیس به‌طور معنی‌داری تنش شوری را تعدیل کرد. تیمار سیلیسیوم سبب افزایش وزن خشک ریشه در توت‌فرنگی شده است (۲۹) که با نتایج پژوهش حاضر هم‌خوانی دارد.

کاهش جذب کلسیم در شرایط تنش شوری یکی از دلایل کاهش سفتی بافت میوه است و افزایش یون سدیم یکی از دلایل محدودیت جذب و انتقال کلسیم در گیاهان است (۱). نتایج دهقانی‌پوده و همکاران (۹) نشان داده است که نانوسیلیس در بیش‌تر صفات اندازه‌گیری‌شده در توت فرنگی مؤثرتر از سیلیکات پتاسیم بوده است. در پژوهش حاضر نیز تیمار ۱ میلی‌مولار نانوسیلیس و تیمار ۲ میلی‌مولار نانوسیلیس به همراه ۰/۲۵ جاسمونیک اسید در شرایط بدون تنش شوری باعث افزایش سفتی بافت میوه در توت‌فرنگی رقم پاروس شد. همچنین جاسمونیک اسید به‌تنهایی در هر دو شرایط تنش و بدون تنش شوری سبب افزایش سفتی بافت میوه شد. همسو با نتایج این پژوهش، گونزالز-آگیولار و همکاران (۱۷) گزارش کرده‌اند که متیل‌جاسمونات و مشتقات آن می‌توانند باعث تغییرات معنی‌داری در سفتی بافت میوه شوند.

رنگ میوه‌ها تحت تأثیر میزان قندها قرار می‌گیرند (۴). افزایش ترکیبات رنگی از جمله ملانین منجر به کاهش درخشندگی رنگ می‌شود (مستوفی و همکاران، ۱۳۸۹). تغییرات رنگ پوست و کاهش pH با کاربرد ۰/۵ میلی‌مولار متیل‌جاسمونات در دو رقم آلو بلک سپلندور (Black Splendor) و رویال رز (Royal Rosa) به تأخیر افتاد (۲۸). در پژوهش حاضر بیش‌ترین درخشندگی مربوط به تیمار ۰/۵ میلی‌مولار جاسمونیک اسید به همراه ۲ میلی‌مولار سیلیس در شرایط بدون تنش شوری و تیمار ۰/۲۵ میل‌مولار جاسمونیک اسید به همراه ۱ میلی‌مولار سیلیس در شرایط تنش شوری بود.

تحت شرایط تنش شوری، تنش اسمزی باعث کاهش فتوسنتز و کاهش تولید کربوهیدرات (۳۲) و همچنین سبب توقف یا کندشدن انتقال جریان آب به‌سمت میوه‌ها می‌شود و در نهایت اندازه میوه‌ها کاهش می‌یابد (۲۱). تنش شوری در توت‌فرنگی ارقام السانتا و کرونا (۳۲) و رقم سلوا (۲۴) باعث کاهش عملکرد شده است. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که تنش شوری باعث کاهش عملکرد می‌شود. کودهای سیلیسی سبب افزایش زیست‌توده و حجم ریشه در بوته‌ها، افزایش فراهمی عناصر غذایی در محیط ریشه (۱۴)، بهبود وضعیت آب در گیاه، افزایش فرایند فتوسنتز، تولید کربوهیدرات‌ها و برقراری تعادل یونی می‌شود (۱۲). پژوهش حاضر نشان داد که نانوذرات سیلیس در شرایط بدون تنش تأثیری بر عملکرد توت‌فرنگی نداشت، اما در شرایط تنش شوری نانوذرات سیلیس توانست به‌طور معنی‌داری اثر تنش شوری را تعدیل و عملکرد را بهبود بخشد.

## نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که تنش شوری سبب کاهش پارامترهای رشدی و عملکردی در گیاه توت‌فرنگی می‌شود. نانوذرات سیلیس و جاسمونیک اسید هر کدام به تنهایی و یا به همراه هم باعث تعدیل تنش شوری شده و سبب افزایش صفات رویشی و زایشی در گیاه توت فرنگی می‌شوند.

## سپاسگزاری

از مرکز پژوهشی به‌نژادی و به‌زراعی توت‌فرنگی به‌خاطر در اختیار گذاشتن امکانات آزمایشگاهی و تجهیزات مورد نیاز سپاسگزاری می‌شود.

## منابع مورد استفاده

1. Abu-Zinada, I.A., 2015. Effect of salinity levels and application stage on cucumber and soil under greenhouse condition. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences* 8(1): 51–73.
2. Ahmad, P., Wani, M.R. (Eds.), 2013. Physiological Mechanisms and Adaptation Strategies in Plants under Changing Environment. Springer Science and Business Media, Vol. 2. Springer New York Heidelberg Dordrecht London.
3. Ahmad, P., Azooz, M.M., Prasad, M.N.V. (Eds.), 2012. Ecophysiology and Responses of Plants under Salt Stress. Springer New York Heidelberg Dordrecht London.
4. Anderea, C., Susana, C., Fonse, A., Morais, B., 2004. Effect of preharvest, harvest and postharvest factor on the quality of pear (cv. Rocha) stored under controlled atmosphere condition. *Journal of Food Engineering* 64: 161–172.
5. Bao-shan, L., shao-qi, D.L., Chun-hui, F., Li-jun, Q., Shu-chun, A., Min., Y., 2004. Effect of TMS (nanostructured silicon dioxide) on growth of Changbai Larch seedlings. *Journal of Forestry Research* 15: 138–140.
6. Berkelaar, E., Beverley, H., 2000. The relationship between morphology and cadmium accumulation in seedling of two durum wheat cultivars. *Canadian Journal of Botany* 78: 381–387.
7. Casierre-posada, F., Garcia, N., 2005. Growth and dry matter partitioning of salt stressed strawberry cultivars (*Fragaria* sp.). *Agronomia Colombiana* 23: 83–90.
8. CIE, Draft Standard 014-4.3/E. 2007. Colorimetry - Part 4: CIE 1976 L*a*b* COLOUR SPACE. Central Bureau Kegelgasse 27 A-1030 Vienna Austria, Page 3.
9. Dehghanipour, S., Ghobadi, S., Baninasab, B., Ghaisari, M., 2011. Effect of potassium silicate and nano-silica on the yield and quality of strawberry fruit. 7th *Iranian Congress of Horticultural Sciences*, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, Volume 1, pp. 755–759.
10. Dar, T.A., Uddin, M., Masroor, M., Khan, A., Hakeem, K.R., Jaleel, H., 2015. Jasmonates counter plant stress: A Review. *Environmental and Experimental Botany* 115: 49–57.
11. Demkura, P.V., Abdala, G., Baldwin, I.T., Ballare, C.L., 2010. Jasmonate dependent and independent pathways mediate specific effects of solar ultraviolet B radiation on leaf phenolics and antiherbivore defense. *Plant Physiology* 152: 1084–1095.
12. Denisow, B., Pogroszewska, E., Laskowska, H., 2015. The effect of silicon on nectar and pollen production in Hosta Tratt. 'Krossa Regal'. *Journal of Acta Scientiarum Polonorum. Hortorum Cultus* 14(4): 131–142.
13. Dombrowski, J.E., 2003. Salt stress activation of wound-related genes in tomato plants. *Plant Physiology* 132: 2098–2017.
14. Epstein, E., 2009. Silicon: its manifold roles in plants. *Annual Applied Biology* 155: 155–160.
15. Eye color. 2002. Color Spaces, CIE Lab- 65 percent.jpg retrieved online February 24, 2003, at http://WWW.ilcolour.com/ knowledge/ measuring- color.asp.
16. Garriga, M., Munoz, C.A., Caligari, P.D., Retamales, J.B., 2015. Effect of salt stress on genotypes of commercial (*Fragaria x ananassa*) and Chilean strawberry (*F. chiloensis*). *Scientia Horticulturae* 195: 37–47.
17. Gonzalez-Aguilar, G.A., Tiznado-Hernandez, M.E., Wang, C.Y., 2006. Physiological and biochemical responses of horticultural products to methyl jasmonate. *Stewart Postharvest Review*. 1: 1–9.
18. Haghighi, M., Mozafariyan, M., 2014. Effect of Si and nano-Si on growth, morphological, and photosynthetic attributes of tomato in hydroponic. *Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture* 5(19): 37–47. (in Persian with English abstract)
19. Iqbal, N., Umar, S., Khan, N.A., Khan, M.I.R., 2014. A new perspective of phytohormones in salinity tolerance: regulation of proline metabolism. *Environmental and Experimental Botany* 100: 34–42.

20. Jayakannan, M., Bose, J., Babourina, O., Rengel, Z., Shabala, S., 2015. Salicylic acid in plant salinity stress signalling and tolerance. *Plant Growth Regulation* 76: 25–40.
21. Kanayama, Y., Kochetov, A., 2015. *Abiotic Stress Biology in Horticultural Plants.* Springer, Tokyo.
22. Kaya, C., Higgs, D., Kirnak, H., 2001. The effect of high salinity (NaCl) and supplementary phosphorus and potassium on physiology and nutrition developmentary of spinach. Bulgar. *Journal of Plant Physiology*. 27: 47–59.
23. Keutgen, A.J., Pawelzik, E., 2009. Impacts of NaCl stress on plant growth and mineral nutrient assimilation in two cultivars of strawberry. *Environmental and Experimental Botany* 65(2): 170–176.
24. Khayyat, M., Tehranifar, A., Davarynejad, G.H., Sayyari-Zahan, M.H., 2014. Vegetative growth, compatible solute accumulation, ion partitioning and chlorophyll fluorescence of 'Malas-e-Saveh'and 'Shishe-Kab'pomegranates in response to salinity stress. *Photosynthetica*, 52(2): 301–312.
25. Khayyat, M., Vazifeshenas, M.R., Rajaee, S., Jamalian, S., 2009. Potassium effect on ion leakage, water usage, fruit yield and biomass production by strawberry plants grown under NaCl stress. *Journal of Fruit and Ornamental Plant Research* 17(1): 79–88.
26. Khodamoradi, P., Amiri, J., Eshghi, S., Doulati, B., 2020. Influence of humic acid on growth, and leaf and root mineral elements of sabrina strawberry under salinity stress. *Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture* 10 (4): 1–19. (in Persian with English abstract)
27. LiangPeng, Y.I., Ma, J., Li, Y., 2007. Impact of salt stress on the features and activities of root system for three desert halophyte species in their seedling stage. *Science in China Series D: Earth Sciences* 50(1): 97–106.
28. Martinez-Esplaa, A., Zapataa, P.J, Castilloa, S., Guilléna, F., Romeroa, M., Barberena, O.A., 2014. Effect of Soil Applied Potassium Silicate on Papaya (*Carica papaya* L.) Plant Growth, Development, Yields, Physiology and, Postharvest Fruit Quality. PhD Thesis, University of Florida, Florida, USA.
29. Miyake, Y., Takahashi, E., 1986. Effect of silicon on the growth and fruit production of strawberry plants in a solution culture. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 32(2): 321–326.
30. Parthier, B., 1990. Jasmonates: Hormonal regulators or stress factors in leaf Senescence? *Journal of Plant Growth regulator* 9:57–63.
31. Pedranzani, H., Racagni, G., Alemano, S., Miersch, O., Ramirez, I., Pena-Cortes, H., Taleisnik, E., Machado-Domenech, E., Abdala, G., 2003. Salt tolerant tomato plants show increased levels of jasmonic acid. *Plant Growth Regulation* 41: 149–158.
32. Saied, A.S., Keutgen, A.J., Noga, G., 2005. The influence of NaCl salinity on growth, yield and fruit quality of strawberry cvs. 'Elsanta'and 'Korona'. *Scientia Horticalturea* 103(3): 289–303.
33. Saiedlar Fatemy, L., Tabatabaei, S.J., Fallahi, E., 2009. The effect of silicon on the growth and yield of strawberry grown under saline conditions. *Journal of Horticaltural Science* 1(19): 107–118. (in Persian with English abstract).
34. Savvas, D., Ntatsi, G., 2015. Biostimulant activity of silicon in horticulture. *Journal of Horticaltural Science* 196: 66–81.
35. Taleisnik, E.., Machado-Domenech, E., Abdala, G., 2003. Salt tolerant tomato plants show increased levels of jasmonic acid. *Plant Growth Regulation* 41: 149–158.
36. Wang, K., Zhang, L.X., Gao, M., Lv, L., Zhao, Y.G., Zhang, L.S., Li, B., Han, M., Alva, A.K., 2013. Influence of salt stress on growth and antioxidant responses of two malus species at callus and plantlet stages. *Pakistan Journal of Botany* 45(2): 375–381.
37. Yilmaz, H., Kina, A., 2008. The influence of NaCl salinity on some vegetative and chemical changes of strawberries (*Fragaria x ananssa* L.). *African Journal of Biotechnology* 7(18): 3299–3305.
38. Yin, C., Wang, X., Duan, B., Luo, J., Li, C., 2005. Early growth, dry matter allocation and water use efficiency of two sympatric populous species as affected by water stress. *Journal of Environment and Experimental Botany* 53: 315–322.
39. Zeinali, A., Moradi, P., 2015. The effects of humic acid and ammonium sulfate foliar spraying and their interaction effects on the qualitative and quantitative yield of native garlic (*Allium sativum* L). *Journal of Applied Environmental and Biological Sciences* 4(12): 205–211.
40. Zorb, C., Senbayram, M., Peiter, E., 2014. Potassium in agriculture status and perspectives. *Journal of Plant Physiology* 171(9): 656–669.

# Effect of Silica Nanoparticles and Jasmonic Acid on Some Physiological Characteristics of Strawberry under Salinity Stress

**S. Osmanpour[1], A.A. Mozafari[*] and N. Ghaderi**

(Received: 19 August 2020; Accepted: 2 January 2021)

## Abstract

Salinity stress is a major factor limiting the plant growth and productivity. Strawberry is a perennial plant and one of the most important small fruits; it is considered as a plant sensitive to salinity. In order to investigate the effects of jasmonic acid and silica nanoparticles on the yield, growth and fruits characteristics of strawberry cv. Paros, an experiment was carried out with three levels of jasmonic acid (0, 0.25 and 0.5 mM) as the spray, three levels of silica nanoparticles (0, 1 and 2 mM), and two sodium chloride levels (0 and 50 mM). Therefore, a factorial experiment was designed based on a completely randomized design with three replications under hydroponic condition. In this study, the length of pedicel, root volume, the dry weights of shoot and root, the percent of the opened leaf stoma, some fruit traits (index color and firmness), leaf specific area, salinity tolerance index and yield were measured. The results showed that growth indices, yield and also, some fruit-related features of this cultivar were decreased by salinity. Application of jasmonic acid and silica nanoparticle improved the fruit quality, yield and morphological characteristics under both control and salinity conditions. Thus, the use of jasmonic acid and silica nanoparticles under salinity stress increased the root volume, crown dry weight, and yield by 49%, 146% and 57%, respectively. The best results were observed in the application of 50 mM jasmonic acid and 0.5 mM silica nanoparticles.

**Keywords**: Greenhouse, Hydroponic, Parous, Salinity, Stress.

**Background and Objective:** Salinity is one of the most important factors limiting the plant production. About 7% of the world's land is affected by salinity, covering 45 million hectares (3). Salinity has a negative effect on all vegetative traits in strawberries; so, it can reduce the strawberry yield by 50% (2). It also reduces the plant uptake of calcium, magnesium, potassium, iron and zinc. With the increase of the salinity level, the yield of the strawberry plants was decreased accordingly. In addition, there are some studies reporting the positive effects of jasmines on plants in response to both biotic and abiotic stresses (4). Jasmons act as chemical messengers in response to a variety of stresses including physical injury, UV radiation and salinity stress (1). This study is the first using jasmonic acid with silica nanoparticles to reduce the effects of the salinity stress on the strawberry plant.

**Methods:** In this study, strawberry seedlings of Parus cultivar were used as the experimental materials. Seedlings were planted in 5 liter pots containing 1:1 volumetric ratio of cocopeat:perlite. First, the seedlings were kept in the greenhouse at the temperature range of 18–22 °C and the relative humidity of 80–85% for two weeks. When the plants were established, the Hoagland's nutrient solution was added to the pots. Jasmonic acid was given to the plants as a foliar spray once every two weeks; silica nanoparticles mixed with the nutrient solution were applied once a day. The duration of the treatment application (duration of the experiment) was considered to be 60 days. Experimental factors

1. Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. P.O. Box: 416, Postal code: 66177-15175. Tel: +98-087-33620552, Fax: +98-087-33620553.
2. Research Center of Strawberry Breeding and Improvement, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. Postal code: 66177-15175.
* Corresponding Author, Email: a.mozafari@uok.ac.ir

consisted of: salinity factor at two levels of zero and 50 mM, silica nanoparticles at three levels of zero, 1 and 2 mM, and jasmonic acid factor at three levels of zero, 0.25 and 0.5 mM. After applying the treatments, yield traits, quantitative and qualitative characteristics of fruit, fruit staining and fruit texture firmness were measured.

**Results:** Salinity stress, as compared to the control (0 mM salinity), did not significantly reduce the length of inflorescence. The highest root volume was obtained in the treatment of 2 mM silica nanoparticles and the zero level of jasmonic acid under non-saline conditions (86.43 $cm^3$/plant). Jasmonic acid at a concentration of 0.5 mM along with 2 mM silica nanoparticles under salinity stress caused a significant increase ($p < 0.01$) in the crown dry weight. The results also showed a 9-fold (897.3%) reduction of the root dry weight in response to salinity stress, as compared to the non-stress condition. Salinity stress reduced fruit firmness, but jasmonic acid and silica nanoparticles were able to significantly compensate the effects of salinity stress. Application of silica nanoparticles, either with or without jasmonic acid, reduced the salinity tolerance. Under non-saline conditions, silica nanoparticles had no significant effect on the yield; however, under salinity stress, silica nanoparticles significantly increased the plant final yield.

**Conclusions:** The results of this study showed that salinity stress reduced the growth and yield parameters of the strawberry plants. Silica and jasmonic acid nanoparticles, either as separate treatments or in combination with each other, moderated the salinity stress and increased the growth of vegetative and reproductive traits of strawberries.

**References**:

1. Dar, T.A., Uddin, M., Masroor, M., Khan, A., Hakeem, K.R., Jaleel, H., 2015. Jasmonates counter plant stress: A Review. *Environmental and Experimental Botany* 115: 49–57.
2. Garriga, M., Munoz, C.A., Caligari, P.D., Retamales, J.B., 2015. Effect of salt stress on genotypes of commercial (*Fragaria x ananassa*) and Chilean strawberry (*F. chiloensis*). *Journal of Scientia Horticulturae* 195: 37–47.
3. Jayakannan, M., Bose, J., Babourina, O., Rengel, Z., Shabala, S., 2015. Salicylic acid in plant salinity stress signalling and tolerance. *Plant Growth. Regulation* 76: 25–40.
4. Yilmaz, H., Kina, A., 2008. The influence of NaCl salinity on some vegetative and chemical changes of strawberries (*Fragaria x ananssa* L.). *African Journal of Biotechnology* 7(18): 3299–3305.