

غنی سازی محلول غذایی با نانوحباب اکسیژن و تغذیه برگ‌گی نانوکلات سیلیسیم بر برخی ویژگی‌های فیزیولوژیک در گل رز شاخه بریده (رقم‌های سامورایی و جوملیا)

رقیه حسین هاشمی^۱، علی نیکبخت*^۱، حامد عالی‌پور^۲ و محمدحسین اهتمام^۳

^۱ گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

^۲ گروه علوم باغبانی و فضای سبز، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۳ گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۱۲، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۰۵/۰۱)

چکیده

در گل‌های شاخه بریده رز، پیری گلبرگ نه تنها ارزش زینتی را محدود می‌کند، بلکه ضرر اقتصادی قابل توجهی را نیز به همراه دارد. بنابراین، تأخیر در پیری گلبرگ‌های گل رز بریده برای کسب سود تجاری بالا بسیار حائز اهمیت است. در همین راستا، پژوهشی با هدف بررسی اثر کاربرد فناوری نوین غنی‌سازی با نانوحباب اکسیژن و نانوکلات سیلیسیم در شرایط کشت بدون خاک بر شاخص‌های فیزیولوژیک، وضعیت روزنه و عمر گلجایی گل‌های رز شاخه بریده انجام پذیرفت. پژوهش حاضر به صورت آزمایش اسپلینت پلات فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه عامل شامل دو رقم رز شاخه بریده (رقم‌های سامورایی و جوملیا)، غنی‌سازی محلول غذایی با نانوحباب اکسیژن (با غلظت نانوحباب اکسیژن صفر و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر و به مدت ۴ دقیقه در هر ساعت) و محلول‌پاشی نانوکلات سیلیسیم ۲٪ (با غلظت صفر و ۲ میلی‌لیتر در لیتر با فاصله ۱۰ روز یکبار) با سه تکرار انجام شد. کاربرد نانوکلات سیلیسیم در مقایسه با تیمار شاهد به ترتیب سبب بهبود ۱۳/۴، ۱۵/۶، ۲۵/۶، ۱۸/۳ و ۲۸/۳ درصدی سطح برگ، کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و محتوای کارتنوئید شد. برهمکنش نانوحباب اکسیژن و نانوکلات سیلیسیم محتوای کلروفیل a (۱۴/۷٪)، کلروفیل b (۲۶/۱٪)، کلروفیل کل (۱۸٪)، کارتنوئید (۲۷/۲٪)، مساحت روزنه (۷/۴۱٪)، قطر روزنه (۴/۴۸٪)، طول روزنه (۷/۳۰٪)، عرض روزنه (۶/۴۹٪) و نسبت تعداد روزنه‌های باز به بسته (۵۳٪) را در مقایسه با شاهد افزایش داد. تأثیر کاربرد نانوحباب اکسیژن اثر بارزتری در مقایسه با نانوکلات سیلیسیم را بر جای گذاشت که می‌توان آن را به‌عنوان تیمار شاخص در افزایش عمر پس از برداشت و کیفیت گل شاخه بریده رز معرفی کرد.

کلمات کلیدی: عمر پس از برداشت، وضعیت روزنه، هیدروپونیک، محتوای آنتوسیانین، قند محلول کل

مقدمه

(Dubey, 2018). ماندگاری و حفظ کیفیت و کاهش عوارض فیزیولوژیک در گل‌های شاخه بریده به دلیل افزایش تقاضای مصرف‌کنندگان امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است

در حال حاضر گل رز یکی از محبوب‌ترین انواع گل‌های شاخه بریده است که همواره در بازار تقاضا دارد (Gupta and

بیولوژیکی و شیمیایی دائماً در دسترس قرار می‌دهند (Nakazawa *et al.*, 2023). از مزایای ذکرشده برای فناوری نانوحباب می‌توان به پایداری طولانی مدت ذرات نانو در آب آبیاری، بهبود توسعه ریشه، بهبود رشد رویشی، افزایش محتویات اوره‌آز و فسفات‌آز و گونه‌های میکروبی خاک اشاره کرد که و نوید رشد بیشتر ریشه‌های محصول و افزایش جذب عناصر غذایی موجود در خاک را می‌دهد و در نهایت منجر به افزایش عملکرد گیاه می‌شود (Bhattarai and Midmore, 2009; Wu *et al.*, 2019; Nakazawa *et al.*, 2023). خواص فیزیکی آب در انتقال آب در آوند چوب دخیل هستند؛ این فرآیندی است که در آن کشش سطحی نقش مهمی ایفا می‌کند و به ایجاد فشار منفی در رابط آب- هوا در اتافک زیر روزنه نیز کمک می‌کند (Domec, 2011).

از سوی دیگر، در چند دهه اخیر استفاده از عناصر سودمند در محصولات گلخانه‌ای توجه زیادی به خود جلب کرده است (Kamenidou *et al.*, 2010). بررسی‌ها نشان داده است که استفاده از ترکیبات بر پایه نانوساختارها و نانوکودها برای رشد، حفاظت در برابر بیماری‌ها و کاهش تنش در گیاهان تأثیرگذار است (Seddon *et al.*, 2012). از جمله نانوکودها که می‌تواند در برنامه تغذیه‌ای گل‌های شاخه بریده قرار گیرد، عنصر مفید سیلیسیم است. افزودن سیلیسیم به بستر بدون خاک یا محلول غذایی اثرات مثبتی بر رشد، نمو و عملکرد گیاهان دارد (Datnoff *et al.*, 2001). ذرات سیلیسیم می‌توانند به طور قابل توجهی موجب افزایش جذب نور و تحریک فتوسنتز، افزایش راندمان آب و اثر بر فعالیت‌های آنزیمی شوند (Mali and Aery, 2008). محققین به این نتیجه رسیدند که کاربرد سیلیسیم تخریب کلروفیل را کاهش می‌دهد و محتوای کلروفیل کل را حفظ می‌کند که می‌تواند در افزایش عمر پس از برداشت گل‌های شاخه بریده لیسپانتوس و رز دخیل باشد (Kazemi *et al.*, 2012; Asgari and Diyanat, 2021). به نظر می‌رسد سیلیسیم با افزایش شاخص کلروفیل برگ، اثر محافظتی بر روی رنگدانه‌های فتوسنتزی از طریق افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی برگ یا واکنش‌های تحریک‌کننده منجر به تولید

(Gupta and Dubey, 2018). به منظور افزایش تولید و پرورش در تمام طول سال، توسعه کشاورزی و غلبه بر محدودیت‌های موجود مانند دسترسی به آب، زمین‌های کوچک، بیماری‌ها و بروز آفات، وجود خاک‌های مشکل‌دار و غیره، تولید گلخانه‌ای گل‌های رز شاخه بریده به روش آبکشت یکی از سیستم‌های برجسته معرفی شده است (Kumari *et al.*, 2018). در سیستم آبکشت مانند کشت غرقابی، ریشه در محلول غذایی غوطه‌ور است و ریشه به صورت دائم به اکسیژن احتیاج دارد که به صورت محلول در محلول غذایی جذب می‌شود (Kumari *et al.*, 2018). تأمین غلظت مناسب اکسیژن موجب دسترسی بیشتر ریشه به اکسیژن می‌شود (Bhattarai and Midmore, 2009)، و به طور مستقیم رشد ریشه گیاه و جذب عناصر غذایی را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد (Wu *et al.*, 2019). با وجود آن که از قسمت‌های هوایی انتقال اکسیژن به بستر گیاه صورت می‌پذیرد، اما سطح آن نسبت به نیاز سیستم ریشه‌ای کمتر است (نیکبخت و اشرفی، ۱۴۰۰). پژوهش‌ها نشان می‌دهد که برای به حداکثر رساندن کنترل بیماری و حداکثر بازده محصول، سطوح ۲۵-۱۵ میلی‌گرم در لیتر اکسیژن برای اکثر محصولات بهینه است (Zhou *et al.*, 2019). پژوهش‌ها نشان داده است که آب آبیاری با سطوح فوق‌اشباع اکسیژن شرایط منطقه ریشه بهتری را برای جذب عناصر غذایی و راندمان جذب آب ایجاد می‌کند (Wu *et al.*, 2019; Baram *et al.*, 2022). سلول‌های ریشه تمام انرژی خود را از طریق تنفس سلولی تولید می‌کنند. سلول‌های مویینه ریشه اکسیژن کافی برای تنفس سلولی را از محیط‌های رشد مختلف به دست می‌آورند (Jost *et al.*, 2011). بر این اساس، استفاده از نانوحباب‌ها به‌عنوان وسیله‌ای ساده برای دستیابی به شرایط بیش بود اکسیژن در تولید محصولات کشاورزی، توجه روزافزونی را به خود جلب کرده است (Baram *et al.*, 2022). نانوحباب‌ها ذراتی با قطر کمتر از ۲۰۰ نانومتر هستند (Agarwal *et al.*, 2011) و به‌جای بالا آمدن روی سطح و بیرون آمدن مانند حباب‌های بزرگ‌تر، در داخل یک مایع شناور می‌شوند و آن‌ها را برای شرکت در واکنش‌های فیزیکی،

بلوک‌های کامل تصادفی با سه عامل شامل دو رقم رز شاخه بریده، غنی‌سازی محلول غذایی با نانوحباب اکسیژن و محلول‌پاشی نانوکلات سیلیسیم با سه تکرار انجام شد. دو رقم رز شاخه بریده 'Samurai' و 'Jumilia' در *R. hybrida* Cvs. این تحقیق به کار گرفته شد. گل‌های رز شاخه بریده در بستر متشکل از کوکوپیت و پرلایت با نسبت ۶۰ به ۴۰ درصد مستقر شدند. در مدت زمان اعمال تیمارها دمای گلخانه در طول روز ۲۴-۲۹ درجه سلسیوس و در طول شب ۱۵-۱۸ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی گلخانه ۵۰-۴۵ درصد بود. محلول غذایی غنی‌شده با نانوحباب اکسیژن به منظور آبیاری و تغذیه روزانه با مقادیر صفر و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر اکسیژن محلول در آب و به مدت ۴ دقیقه در هر ساعت در اختیار گیاهان قرار گرفت، فرمول غذایی گیاهان براساس جدول ۱ اعمال شد. اسیدیته محلول غذایی با استفاده از اسید نیتریک ۶۵٪ پیرامون ۵/۵-۵/۸ تنظیم شد. پمپ تولیدکننده نانوحباب اکسیژن از شرکت دانش‌بنیان دانا تجهیز پترو آب (دانتک)، دانشگاه صنعتی اصفهان تهیه شد، اندازه ذرات استفاده‌شده زیر ۱۰۰ نانومتر بوده که با روش رشته‌های نوری پویا (Daynamic light string) در آزمایشگاه نانو تکنولوژی دانشگاه صنعتی اصفهان اندازه‌گیری شده است. محلول‌پاشی نانوکلات سیلیسیم ۲ درصد با غلظت صفر و ۲ میلی‌لیتر در لیتر با فاصله ۱۰ روز یکبار صورت گرفت که از شرکت صدور احرار شرق با نام تجاری خضرا، تهران تهیه شد که قطر ذرات این کود ۴۰ نانومتر و کلاتور آن ارگانیک اسید پلیمرشده گزارش شده است (شکل ۱) (Nazaran, 2012). صابون محلول‌پاشی یونی با مقدار ۰/۵ میلی‌لیتر در لیتر به محلول نانوکلات سیلیسیم پس از اختلاط با آب در هر دور محلول‌پاشی اضافه شد. تیمارهای موردنظر به مدت ۸ ماه اعمال شد.

صفات مورد ارزیابی: جهت اندازه‌گیری ویژگی‌های روزنه

از جمله تعداد، طول و عرض، محیط و مساحت، تعداد روزنه‌های باز و بسته و نسبت آن به یکدیگر از سطح زیرین اولین برگ تکامل‌یافته پنج برگچه‌ای گل‌های رز شاخه بریده پس از ۲۰ مرحله محلول‌پاشی با نانوکلات سیلیسیم در بازه

این رنگ‌دانه‌ها یا ترکیبی از هر دوی آن‌ها می‌شود (Asgari and Diyanat, 2021). تحریک فتوسنتز در اثر کاربرد سیلیسیم و به دنبال آن افزایش فعالیت آنزیم رویسکو و محافظت از کلروپلاست و تیلاکوئید به دلیل افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و آنتی‌اکسیدان‌های غیرآنزیمی، باعث افزایش فتوسنتز می‌شود. در اثر افزایش فتوسنتز، میزان کربوهیدرات درون گیاه و همچنین محتوای آنتوسیانین افزایش می‌یابد (Savvas and Ntatsi, 2015)، و به دنبال آن عمر گلجایی و بازارپسندی گل‌های رز شاخه بریده نیز بهبود می‌یابد. محققان عنوان کرده‌اند اعمال سیلیسیم می‌تواند تنظیم باز و بسته شدن روزنه‌ها را تحت تأثیر قرار دهد و بر بهبود فتوسنتز در گیاهان تأثیرگذار باشد (Sun et al., 2021). از سوی دیگر، کاربرد سیلیسیم باعث بهبود وضعیت روزنه و اثر مثبت بر تراکم و شاخص روزنه می‌شود (Torabi et al., 2015). به نظر می‌رسد که رسوب سیلیسیم در برگ‌ها، به ویژه در سلول‌های نگهبان روزنه می‌تواند طول و عرض روزنه را تغییر دهد (Torabi et al., 2015) و در نهایت عمر پس از برداشت و کیفیت گل‌های شاخه بریده را افزایش دهد.

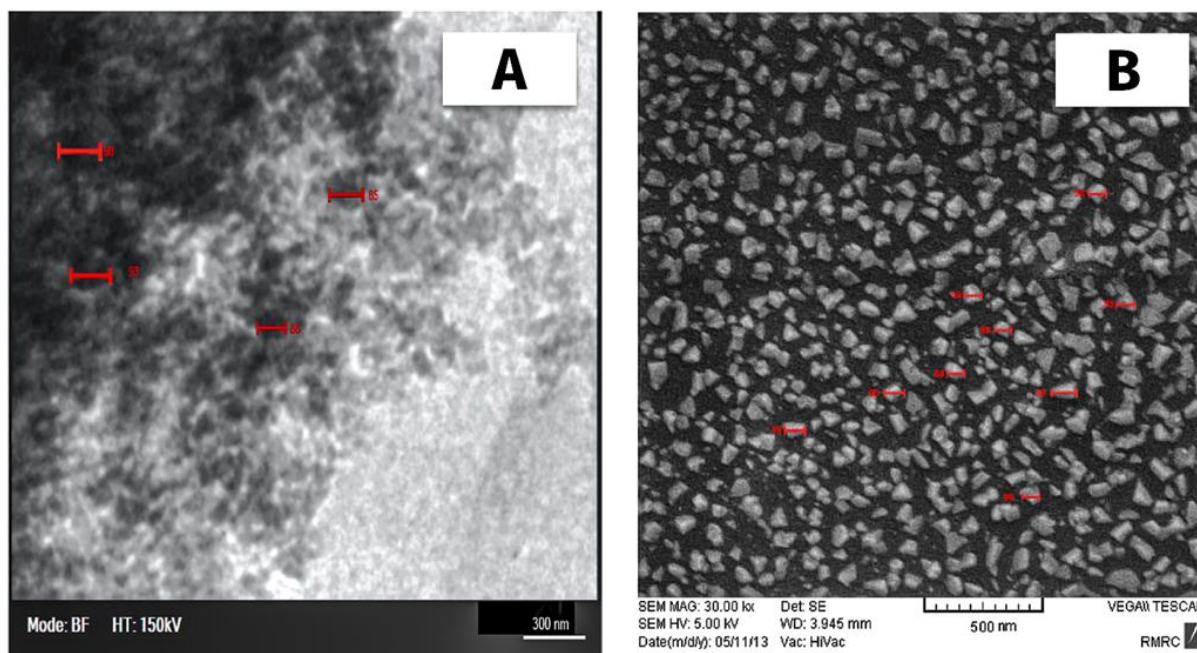
با توجه به مطالعات صورت‌گرفته و بررسی‌های انجام‌شده اطلاعات اندکی در رابطه با ویژگی‌های فیزیولوژیک و وضعیت روزنه در صورت کاربرد همزمان محلول غذایی غنی‌شده با نانو حباب اکسیژن و محلول‌پاشی نانوکلات سیلیسیم در گل‌های رز شاخه بریده رقم سامورایی و جوملیا در بستر بدون خاک در دسترس است. لذا این پژوهش با هدف بررسی اثر برهمکنش غنی‌سازی محلول غذایی با نانوحباب اکسیژن و محلول‌پاشی نانوکلات سیلیسیم بر برخی از ویژگی‌های فیزیولوژیکی و وضعیت روزنه گل‌های شاخه بریده رز رقم‌های سامورایی و جوملیا مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

این آزمایش طی سال‌های ۱۴۰۱-۱۴۰۰ در سالن رز گلخانه شیشه‌ای دانشگاه صنعتی اصفهان انجام شد. این تحقیق به‌صورت آزمایش اسپلیت پلات فاکتوریل در قالب طرح

جدول ۱- وزن خالص عناصر غذایی مورد استفاده در آزمایش به‌ازای هر ۱۰۰۰ لیتر آب (Nazaran, 2012)

منبع کودی	مقدار خالص عنصر (g)	نوع عنصر
۱۲-۱۲-۳۶، نانو کلات کلسیم ۰/۷، نانو کلات منیزیم ۰/۶، نیتریک اسید ۰/۶۵	۵۰	نیتروژن
۱۲-۱۲-۳۶	۲۰/۴	فسفر
۱۲-۱۲-۳۶	۵۹/۷	پتاسیم
نانو کلات کلسیم ۰/۷	۱۷/۵	کلسیم
نانو کلات منیزیم ۰/۶	۶	منیزیم
نانو کلات آهن ۰/۹، نانو کلات میکرو کامل	۳/۸	آهن
نانو کلات میکرو کامل	۰/۴۵	روی و منگنز
نانو کلات میکرو کامل	۰/۱۵	مس، مولیبدن و بور



شکل ۱- تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) از کود نانوکلات سیلیسیم (a). همانطور که در تصویر مشخص شده مشاهده می‌شود، ذرات تقریباً بین ۸۰ تا ۹۰ نانومتر هستند. این تصویر توسط دستگاه EM900 (150KV) دانشگاه تهران گرفته شده است. تصویر SEM (میکروسکوپ الکترونی روبشی) از کود نانوکلات سیلیسیم خضرا. (b). همانطور که مشاهده می‌شود ذرات تقریباً ۴۰-۵۰ نانومتر هستند. این تصویر توسط دستگاه HITACHI SU-5000 (500 KV) در پژوهشگاه صنعت نفت گرفته شده است.

Dino Capture (Eyepieces Dino-Eye) با استفاده از نرم‌افزار 2 عکس‌برداری شد. در نهایت با استفاده از نرم‌افزار Digimizer (نسخه ۴/۱/۱) شاخص‌های روزنه اندازه‌گیری شد (Daneshmand et al., 2024).

به منظور اندازه‌گیری سطح برگ، ۱۰ برگ پنج برگچه‌ای از هر گیاه انتخاب شد، سپس با استفاده از اسکنر (CanoScan

زمانی ۱۱-۱۰ صبح درحالی‌که برگ به شاخه متصل بود؛ نمونه‌برداری انجام شد. به‌منظور نمونه‌برداری لاک ناخن شفاف بر روی سطح زیرین برگ کشیده شد و پس از آن چسب نواری روی آن چسبانده و پس از جداکردن اپیدرم، لاک و چسب بر روی لام قرار داده شدند و سپس از این لام‌ها با کمک میکروسکوپ (OLYMPUS CH-2) مجهز به دوربین

و پس از سپری‌شدن این زمان طول عمر این گل‌ها در آزمایشگاه پس از برداشت دانشگاه صنعتی اصفهان اندازه‌گیری شد. آزمایشگاه در دمای ۲۵ درجه سلسیوس با چرخه نوری روشنایی به تاریکی ۱۶:۸ ساعت، ۳۵۰۰ لوکس نور اعمال شده توسط لامپ‌های فلورسنت سفید و رطوبت نسبی ۶۰-۵۰٪ بود. در طول عمر گلجایی گل‌ها، محلول گلجایی هر دو روز یکبار تعویض شد و تقریباً ۱ سانتی‌متر از انتهای تمام ساقه‌های گل کوتاه شد. در این پژوهش، اصطلاح پایان عمر گلجایی از زمان انتقال گل‌ها به آزمایشگاه تا زمانی که حداقل یکی از علائم زیر را نشان دهند اطلاق می‌شود: پیچ‌خوردگی یا پژمردگی گلبرگ‌ها، خم‌شدن گردن گل (بیش از ۹۰ درجه)، تغییر رنگ و کندشدن گلبرگ‌ها از این علائم هستند (Rezai *et al.*, 2023).

به‌منظور بررسی آماری داده‌های مربوط به هر صفت در این پژوهش از نرم‌افزار SAS (نسخه ۹/۴)، و جهت نرمال‌سازی داده‌ها و بررسی همبستگی میان صفات از نرم‌افزار Statistix (نسخه ۸) استفاده شد.

نتایج و بحث

وضعیت روزنه: استفاده از رقم‌های مختلف در سطح احتمال ۱ درصد بر تعداد، مساحت، محیط، طول و عرض روزنه، تعداد روزنه‌های باز و بسته و نسبت آن‌ها معنی‌دار بود (جدول ۲). برهمکنش رقم و نانوحباب اکسیژن به ترتیب بر تعداد و طول روزنه در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). همچنین برهمکنش نانوحباب اکسیژن و نانوکلات سیلیسیم بر تعداد روزنه، طول روزنه، تعداد روزنه‌های باز و بسته در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). برهمکنش سه‌گانه به ترتیب بر طول روزنه و تعداد روزنه‌های بسته در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). اعمال نانوحباب اکسیژن در مقایسه با تیمار شاهد به ترتیب در ارقام سامورایی کاهش ۱۸/۶ و ۵/۱۷ درصدی و در ارقام جوملیا افزایش ۵/۲۵ و ۱۶/۲ درصدی بر تعداد روزنه و طول روزنه را به همراه داشت (داده‌ها ارائه نشده است). کاربرد نانوکلات سیلیسیم

(LIDE 700F) اسکن شدند و با استفاده از نرم‌افزار Digimizer (نسخه ۴/۱/۱) این پارامتر ارزیابی شد.

محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی شامل کلروفیل a، b و کارتنوئید براساس روش Lichtenthaler (۱۹۸۷) اندازه‌گیری شد. ۰/۱ گرم از نمونه تازه اولین برگ تکامل‌یافته پنج برگچه‌ای پس از ۲۰ مرحله محلول‌پاشی با نانوکلات سیلیسیم پس از همگن‌شدن با استون ۱۰۰٪ سانتریفیوژ شد، سپس با دستگاه اسپکتروفتومتر مدل Shimadzu UV-160A ساخت ژاپن (به منظور اندازه‌گیری کلروفیل a، b و کارتنوئید به ترتیب میزان جذب نور در طول موج‌های ۶۶۳، ۶۴۵ و ۴۷۰ نانومتر ثبت شد (Lichtenthaler, 1987)).

سنجش قند محلول کل با روش Irigoyen (۱۹۹۲) انجام شد. نمونه‌های برگ بعد از همگن‌شدن با اتانول ۹۵٪ و دو مرحله شستشو و سانتریفیوژ با اتانول ۷۰٪ به درون لوله‌های شیشه‌ای حاوی معرف آنترون منتقل و به مدت ۱۰ دقیقه در بن‌ماری قرار گرفتند و میزان جذب نور نمونه‌ها و استانداردها در طول موج ۶۲۵ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر ثبت شد (Irigoyen *et al.*, 1992).

به منظور اندازه‌گیری غلظت آنتوسیانین گلبرگ، ۰/۲ گرم از بافت تازه گلبرگ پس از ۲۰ مرحله محلول‌پاشی با نانوکلات سیلیسیم به همراه محلول استخراج (متانول: اسید کلریدریک؛ نسبت حجمی ۹۹ به ۱) همگن و به مدت ۲۴ ساعت در تاریکی و در دمای ۲۵ درجه سلسیوس قرار گرفت. پس از آن که نمونه‌ها در دور ۴۰۰۰ به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ شدند. میزان جذب نور نمونه‌ها در طول موج ۵۵۰ نانومتر ثبت و با استفاده از فرمول واگنر محتوای آنتوسیانین کل محاسبه شد (Wagner, 1979):

$$(1) A = \epsilon bc$$

A: میزان جذب در طول موج ۵۵۰ نانومتر، ϵ : ضریب خاموشی معادل $33000 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$; b: عرض سلول اندازه‌گیری شده برابر ۱ cm و c: مقدار آنتوسیانین.

گل‌های رز شاخه بریده پس از برداشت به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۴ درجه سلسیوس (سردخانه) در تاریکی قرار گرفتند

جدول ۲- تجزیه واریانس ویژگی‌های روزنه تحت تیمار نانوحباب اکسیژن و نانوکلات سیلیسیم ارقام رز سامورایی و جوملیا

میانگین مربعات								df	منابع تغییرات
تعداد روزنه	تعداد روزنه بسته	مساحت روزنه	محیط روزنه	طول روزنه	عرض روزنه	تعداد روزنه	باز/ بسته		
۶۰/۳**	۹۶۲**	۳۵۲**	۰/۰۰۰۰۲**	۰/۰۱۵**	۰/۰۰۰۰۹**	۰/۰۰۲**	۱۵۰**	۱	رقم (A)
۲/۲۱ ^{ns}	۶ ^{ns}	۱/۵ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۰۰۵ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۶ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۰۶ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۱ ^{ns}	۱۳/۵ ^{ns}	۱	نانوحباب اکسیژن (B)
۱/۷۸ ^{ns}	۶ ^{ns}	۰/۱۶۶ ^{ns}	۰ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۰۰۴ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۳ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۰۴ ^{ns}	۴/۱۶ ^{ns}	۱	نانوکلات سیلیسیم (C)
۰/۱۸۶ ^{ns}	۴۲/۶**	۰/۱۶۶ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۰۰۹ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۱ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۳*	۰/۰۰۰۰۰۰۱ ^{ns}	۴۸/۱**	۱	(B) × (A)
۰/۷۷۷ ^{ns}	۱۵۰**	۰/۱۶۶ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۰۰۱ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۰۰۱ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۰۰۲ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۰۰۱ ^{ns}	۱۶۰**	۱	(C) × (A)
۱/۶۷ ^{ns}	۴۲/۶**	۳۲/۶**	۰/۰۰۰۰۰۰۱ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۲ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۰۰۵ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۰۰۶**	۱۵۰**	۱	(C) × (B)
۰/۱۰۸ ^{ns}	۲/۶ ^{ns}	۲۴**	۰/۰۰۰۰۰۰۱ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۱*	۰/۰۰۰۰۰۰۲*	۰/۰۰۰۰۰۰۳ ^{ns}	۴/۶**	۱	(C) × (B) × (A)
۲/۲۰	۳/۶۶	۲/۶۵	۰/۰۰۰۰۰۰۰۵	۰/۰۰۰۰۰۰۴	۰/۰۰۰۰۰۰۵	۰/۰۰۰۰۰۰۲	۵/۰۲		خطا
۵۹/۸	۱۳/۵	۱۷/۴	۱۷/۳	۹/۰۲	۹/۴۲	۸/۵۴	۹/۵۴		%Cv

**، * و ns به ترتیب نمایانگر معنی‌دار بودن در سطح ۱٪، ۵٪ و عدم وجود تفاوت معنی‌دار است.

نسبت به عدم کاربرد آن در ارقام سامورایی و جوملیا به ترتیب سبب کاهش ۲۵ و افزایش ۱۸/۱ درصدی تعداد روزنه شد (داده‌ها ارائه نشده است). این در حالی است که، اعمال نانوکلات سیلیسیم در رقم جوملیا بهبود ۲۱/۶ درصدی در تعداد روزنه‌های باز را به نشان داد (داده‌ها ارائه نشده است). بیشترین تعداد روزنه در گل‌های رقم جوملیا تحت تیمار نانوحباب اکسیژن و نانوکلات سیلیسیم و کمترین آن در گیاهان تحت تیمار نانوکلات سیلیسیم در رقم سامورایی مشاهده شد (جدول ۳). بیشترین عرض روزنه در رقم سامورایی تحت تیمار هم‌زمان نانوحباب اکسیژن و نانوکلات سیلیسیم و کمترین آن در رقم جوملیا تحت تیمار نانوکلات سیلیسیم مشاهده شد. بیشترین تعداد روزنه‌های باز به ترتیب متعلق به رقم جوملیا و سامورایی تحت تیمار هم‌زمان نانوحباب اکسیژن و نانوکلات سیلیسیم بود (جدول ۴ و شکل ۲).

محققان عنوان کردند که تراکم و طول روزنه در دو رقم گل رز شاخه بریده (*Rosa hybrida* L.) تفاوت معنی‌داری را نشان داده است (حاتمیان و همکاران، ۱۳۹۳). همچنین تفاوت در تراکم روزنه‌ای در بین دو رقم ممکن است به دلیل ویژگی‌های ژنتیکی دو رقم ژبررا (*Gerbera jamesonii* L.) باشد (Romero-Aranda et al., 1994). بررسی تراکم روزنه در

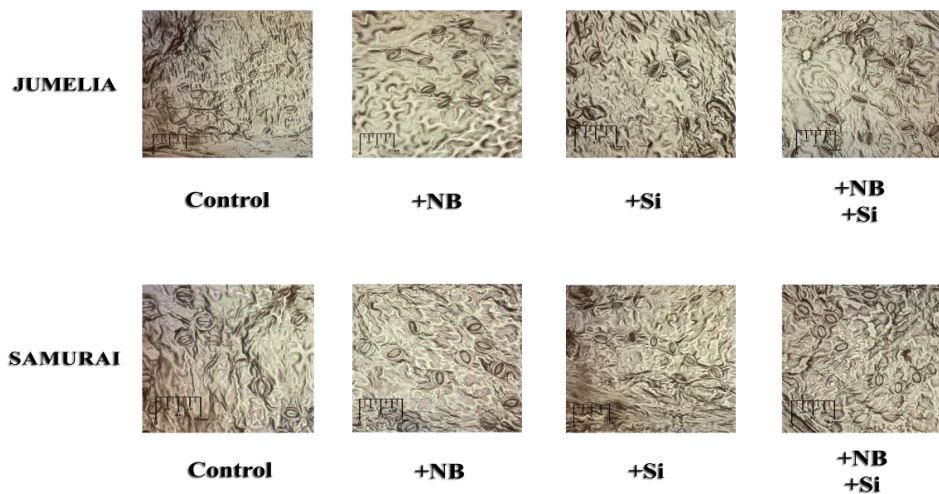
سطوح بالایی و پایینی برگ‌های دو رقم گل شاخه بریده ژبررا نشان داد که تراکم روزنه در بین دو رقم و همچنین دو سطح برگ در یک رقم متفاوت است (Romero-Aranda et al., 1994). حاتمیان و همکاران (۱۳۹۳) عنوان کردند طول و تعداد روزنه در رزهای رقم ردوان و گلیمرا متفاوت است (حاتمیان و همکاران، ۱۳۹۳). Koentjoro و همکاران (۲۰۲۰) عنوان کردند اعمال سیلیسیم در گیاه سویا باعث بازشدن بیشتر روزنه می‌شود (Koentjoro et al., 2020).

اصلی‌ترین وسیله تبادلات گازی در گیاهان آوندی روزنه‌های برگ هستند (Koentjoro et al., 2020). روزنه شکافی است که معمولاً در سطح زیرین برگ‌ها تجمع یافته‌اند و توسط دو سلول اپیدرمی لویبایی شکل تحت عنوان سلول‌های نگهبان روزنه احاطه شده‌اند که کنترل باز و بسته شدن روزنه را بر عهده دارد (Koentjoro et al., 2020). روزنه‌ها نقش مهمی به عنوان دریچه در ورود و خروج بخار آب، دی‌اکسید کربن و اکسیژن دارند (حاتمیان و همکاران، ۱۳۹۳؛ Koentjoro et al., 2020). با توجه به آن که عنصر سیلیسیم موجب بهبود تحمل به تنش‌های محیطی و بهبود تعادل عناصر غذایی در گیاهان می‌شود (Reezi et al., 2018) می‌توان عنوان کرد که اعمال نانوکلات سیلیسیم بر روی

جدول ۳- مقایسه میانگین رقم، نانوحباب اکسیژن و نانوکلات سیلیسیم بر صفات روزنه در ارقام رز سامورایی و جوملیا

تیمارها	تعداد روزنه	عرض روزنه (mm)	طول روزنه (mm)	محیط روزنه (mm ²)	مساحت روزنه (mm ³)	صفات اندازه گیری شده	
						تعداد روزنه بسته	تعداد روزنه های باز
رقم‌ها							
جوملیا	۲۶ ^a	۰/۰۰۳ ^b	۰/۲۰۳ ^b	۰/۰۷۳ ^b	۰/۰۵۲ ^b	۵/۵۰ ^b	۲۰/۵ ^a
سامورایی	۲۱ ^b	۰/۰۰۵ ^a	۰/۲۵۳ ^a	۰/۰۸۶ ^a	۰/۰۷۰ ^a	۱۳/۱ ^a	۷/۸۳ ^b
نانوحباب اکسیژن							
کاربرد	۲۲/۷ ^a	۰/۰۰۴ ^a	۰/۲۳۳ ^a	۰/۰۸۱ ^a	۰/۰۶۲ ^a	۹/۰۸ ^a	۱۳/۶ ^a
عدم کاربرد	۲۴/۲ ^a	۰/۰۰۳ ^a	۰/۲۲۳ ^a	۰/۰۷۸ ^a	۰/۰۶۰ ^a	۹/۵۸ ^a	۱۴/۶ ^a
نانوکلات سیلیسیم							
کاربرد	۲۳/۰۸ ^a	۰/۰۰۴ ^a	۰/۲۲۸ ^a	۰/۰۸۱ ^a	۰/۰۶۲ ^a	۹/۴۱ ^a	۱۳/۶ ^a
عدم کاربرد	۲۳/۹ ^a	۰/۰۰۴ ^a	۰/۲۲۸ ^a	۰/۰۷۹ ^a	۰/۰۶۰ ^a	۹/۲۵ ^a	۱۴/۶ ^a

در هر ستون (هر تیمار به صورت جداگانه) میانگین‌هایی که دارای حروف مشابه هستند، در سطح ۵٪ آزمون LSD با یکدیگر اختلاف معنی دار ندارند.



شکل ۲- تصویر میکروسکوپی پارامترهای روزنه در گل‌های رقم‌های جوملیا و سامورایی در شرایط کاربرد نانوحباب اکسیژن و نانوکلات سیلیسیم با استفاده از میکروسکوپ OLYMPUS CH-2 و مجهز به دوربین Eyepieces Dino- با بزرگنمایی ۴۰، شاهد Control رقم سامورایی، 'Samurai' رقم جوملیا، '+Si' 'Jumelia' کاربرد نانوکلات سیلیسیم، '+NB' کاربرد نانوحباب اکسیژن، '+NB +Si' کاربرد همزمان نانوحباب اکسیژن و نانوکلات سیلیسیم

گل‌های رز شاخه بریده از ایجاد هر گونه تنش جلوگیری می‌کند و سبب بهبود وضعیت روزنه‌ای در گیاهان می‌شود. از سوی دیگر، پتاسیم از جمله عناصری است که نقش بسزایی در باز و بسته شدن روزنه‌ها دارد (Datnoff et al., 2001). نانوسیلیسیم به دلیل وجود مکانیسم‌های مختلف جذب مانند تولید اسیدهای آلی توسط ریشه جذب این عنصر را تسهیل می‌کند (Li et al., 2023). از طرفی سیلیسیم قابلیت فعال کردن H⁺-ATPase در غشای پلاسمایی را دارد و جذب

دانوف (Datnoff et al., 2001). نانوسیلیسیم به دلیل وجود مکانیسم‌های مختلف جذب مانند تولید اسیدهای آلی توسط ریشه جذب این عنصر را تسهیل می‌کند (Li et al., 2023). از طرفی سیلیسیم قابلیت فعال کردن H⁺-ATPase در غشای پلاسمایی را دارد و جذب

جدول ۴- مقایسه میانگین سه گانه اثر متقابل رقم × نانوحباب اکسیژن × نانوکلات سیلیسیم بر شاخص‌های روزنه در ارقام رز سامورایی و جوملیا

رقم	تیماها		صفات اندازه‌گیری شده							
	نانوحباب اکسیژن	نانوکلات سیلیسیم	تعداد روزنه	مساحت روزنه (mm ²)	محیط روزنه (mm ²)	طول روزنه (mm)	عرض روزنه (mm)	تعداد روزنه بسته	تعداد روزنه باز	باز/بسته
جوملیا	عدم	عدم کاربرد	۲۴/۳ ^b	۰/۰۰۳ ^{bc}	۰/۲۰۵ ^{bc}	۰/۰۷۱ ^{cd}	۰/۰۵۶ ^{de}	۵/۶۶ ^c	۱۸/۶ ^b	۳/۴۲ ^{abc}
	کاربرد	کاربرد	۲۶/۳ ^{ab}	۰/۰۰۲ ^c	۰/۱۷۵ ^c	۰/۰۶۵ ^d	۰/۰۴۷ ^e	۵/۶۶ ^c	۲۰/۶ ^b	۳/۹۳ ^{ab}
	عدم کاربرد	عدم کاربرد	۲۳/۳ ^{bc}	۰/۰۰۳ ^{bc}	۰/۱۹۸ ^{bc}	۰/۰۷۳ ^{bcd}	۰/۰۴۹ ^e	۵ ^c	۱۸/۳ ^b	۳/۸۱ ^{ab}
	کاربرد	کاربرد	۳۰ ^a	۰/۰۰۴ ^{ab}	۰/۲۳۳ ^{ab}	۰/۰۸۵ ^{ab}	۰/۰۵۶ ^{de}	۵/۶۶ ^c	۲۴/۳ ^a	۵/۱۱ ^a
سامورایی	عدم	عدم کاربرد	۳۰ ^a	۰/۰۰۵ ^a	۰/۲۵۹ ^a	۰/۰۸۶ ^{ab}	۰/۰۷۲ ^{ab}	۱۵/۶ ^a	۱۴/۳ ^c	۰/۹۱۹ ^{cd}
	کاربرد	کاربرد	۱۶/۳ ^d	۰/۰۰۵ ^a	۰/۲۵۳ ^a	۰/۰۹۱ ^a	۰/۰۶۷ ^{bc}	۱۱/۳ ^b	۵ ^d	۰/۴۴۱ ^d
	عدم کاربرد	عدم کاربرد	۱۸ ^d	۰/۰۰۴ ^a	۰/۲۴۹ ^a	۰/۰۸۵ ^{ab}	۰/۰۶۱ ^{cd}	۱۰/۶ ^b	۷/۳۳ ^d	۰/۶۸۷ ^d
	کاربرد	کاربرد	۱۹/۶ ^{cd}	۰/۰۰۵ ^a	۰/۲۵۲ ^a	۰/۰۸۳ ^{abc}	۰/۰۸۱ ^a	۱۵ ^a	۴/۶۶ ^d	۱/۵۳ ^{bcd}

ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، طبق آزمون LSD فاقد تفاوت معنی دار هستند.

بیشترین سطح برگ به تیمار نانوکلات سیلیسیم در رقم سامورایی تعلق داشت (جدول ۷).

بر اساس تحقیقات مختلف می‌توان عنوان کرد؛ استفاده از سیلیسیم سبب افزایش سطح برگ در رز شاخه بریده (R. *Petunia hybrida* (hybrida Cv. Beverly watson)، اطلسی (L. *Cucumis sativus* L.)، خیار (L. *aestivum* L.) می‌شود (بیات و همکاران، ۱۳۹۱؛ مامرشپور و نظری دلجو، ۱۳۹۷؛ Li et al., 2023؛ Jalilzadeh Khoie et al., 2024)، که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد.

تأثیر سیلیسیم بر عملکرد گیاه ممکن است به دلیل رسوب آن در پهنای برگ، افزایش استحکام برگ‌ها و نیز افزایش غلظت کلروفیل در واحد سطح برگ باشد که از این طریق یک لایه سیلیکات دوگانه بر روی اپیدرم تشکیل می‌دهد که باعث آرایش بهتر برگ و افزایش ظرفیت جذب نور می‌شود (Song et al., 2021)، همچنین نانوذرات سیلیسیم فشار اسمزی و ساینز گیاه را از طریق بهبود کارایی استفاده از آب و مقدار نسبی آب برگ افزایش می‌دهد (Baram et al., 2022) و موجب بهبود پارامترهای رشد و نمو و پتانسیل فتوسنتزی (سطح برگ و کلروفیل) می‌شوند (مامرشپور و نظری دلجو، ۱۳۹۷). کاهش سطح برگ در اثر ایجاد تنش در گیاهان منجر

یون پتاسیم از طریق شیب الکتروشیمیایی، کانال‌های K⁺ و انتقال را افزایش می‌دهد (Datnoff et al., 2001). یکی از اثرات نانوحباب اکسیژن، در راستای رفع تنش ناشی از کمبود اکسیژن است. این در نانوحباب‌ها به دلیل وجود بارهای منفی می‌تواند بر ظرفیت تبادل کاتیونی ریشه اثرگذار باشند و جذب عناصر غذایی را بهبود ببخشند و عناصر با بار الکتریکی مثبت مانند پتاسیم را راحت‌تر از خاک جذب کنند (Ebina et al., 2013). بنابراین پتاسیم می‌تواند بر تعداد، مساحت، طول، عرض و تعداد روزنه‌های باز و بسته اثر مثبت داشته باشد (Datnoff et al., 2001). احتمال می‌رود برهمکنش نانوحباب اکسیژن موجب بهبود جذب عنصر پتاسیم و اعمال نانوکلات سیلیسیم نیز موجب از بین بردن هر گونه تنش احتمالی بر گل‌های رز شاخه بریده و جذب عنصر پتاسیم می‌شود و در نهایت سبب بهبود وضعیت روزنه‌ای در ارقام مختلف می‌شود.

سطح برگ: استفاده از ارقام مختلف و اثر تیمار نانوکلات سیلیسیم بر سطح برگ در سطح احتمال ۱ درصد معنی دار بود (جدول ۵). اعمال تیمار نانوکلات سیلیسیم موجب افزایش ۱۳/۴ درصدی سطح برگ در مقایسه با تیمار شاهد شد (جدول ۶). رقم سامورایی در مقایسه با رقم جوملیا بهبود ۲۵/۱ درصدی بر سطح برگ را نشان داد (جدول ۶). از طرفی

جدول ۵- تجزیه واریانس ویژگی های فیزیولوژیک و عمر گلجایی تحت تیمار نانوحباب اکسیژن و نانوکلات سیلیسیم ارقام رز سامورایی و جوملیا

منابع تغییرات	df	میانگین مربعات							
		سطح برگ	کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل کل	کارتونوئید	قند محلول کل	آنتوسیانین	عمر گلجایی
رقم (A)	۱	۶۲۵۴**	۲۲/۹*	۴/۴۷ ^{ns}	۴۷/۷*	۲۳/۶ ^{ns}	۰/۰۱۹**	۶۱۷۵۵۷**	۴۵۹**
نانوحباب اکسیژن (B)	۱	۱۴۰ ^{ns}	۰/۶۸۵ ^{ns}	۰/۱۴۵ ^{ns}	۱/۴۶ ^{ns}	۱/۸۴ ^{ns}	۰/۰۰۳**	۳۰/۰۹ ^{ns}	۵۷/۰۴**
نانوکلات سیلیسیم (C)	۱	۱۹۴۰**	۳۳/۵**	۱۶/۳**	۹۶/۷**	۹۲/۰۵**	۰/۰۲۰**	۱۹/۲ ^{ns}	۰/۳۷۵ ^{ns}
(B) × (A)	۱	۵۷/۶ ^{ns}	۵/۵۴ ^{ns}	۰/۱۶۰ ^{ns}	۷/۵۹ ^{ns}	۰/۰۷۷ ^{ns}	۰/۰۰۰۱ ^{ns}	۶۶۷**	۵۷/۰۴**
(C) × (A)	۱	۴۷۶ ^{ns}	۷/۳۴ ^{ns}	۹/۳۱*	۳۳/۲ ^{ns}	۴۵/۴**	۰/۰۰۲**	۷۴۷**	۵/۰۴ ^{ns}
(C) × (B)	۱	۰/۷۳۶ ^{ns}	۵۳/۰۷**	۱۴/۹**	۱۲۴**	۷۰/۷*	۰/۰۰۰۵ ^{ns}	۱۱۸ ^{ns}	۴۰/۰۴**
(C) × (B) × (A)	۱	۹۵/۱ ^{ns}	۲/۷۳ ^{ns}	۰/۳۶۴ ^{ns}	۵/۰۹ ^{ns}	۱/۲۹ ^{ns}	۰/۰۰۱**	۴/۶۲ ^{ns}	۹/۳۷ ^{ns}
خطا		۱۶۰	۳/۲۳	۱/۹۴	۸/۹۷	۱۱/۰۸	۰/۰۰۰۲	۷۸/۹	۴/۱۹
Cv/%		۸/۹	۱۱/۰۶	۱۹/۱	۱۲/۷	۲۱/۲	۱/۳۷	۴/۸۱	۹/۷۳

**، * و ns به ترتیب نمایانگر معنی دار بودن در سطح ۱٪، ۵٪ و عدم وجود تفاوت معنی دار است.

جدول ۶- مقایسه میانگین رقم، نانوحباب اکسیژن و نانوکلات سیلیسیم بر صفات فیزیولوژیک و عمر گلجایی در ارقام رز سامورایی و جوملیا

تیمارها	سطح برگ (cm ²)	کلروفیل a (mg.g ⁻¹)	کلروفیل b (mg.g ⁻¹)	کلروفیل کل (mg.g ⁻¹)	کارتونوئید (mg.g ⁻¹)	قند محلول کل (mg.g ⁻¹)	آنتوسیانین (μmol.g ⁻¹)	عمر گلجایی (روز)	صفات اندازه گیری شده
									رقم ها
جوملیا	۱۲۶/۲ ^b	۱۵/۲ ^b	۶/۸۲ ^a	۲۲/۱ ^b	۱۴/۸ ^a	۱/۱۷ ^a	۲۳/۹ ^b	۲۵/۴ ^a	رقم ها
سامورایی	۱۵۸ ^a	۱۷/۲ ^a	۷/۶۹ ^a	۲۴/۹ ^a	۱۶/۷ ^a	۱/۱۱ ^b	۳۴۴ ^a	۱۶/۶ ^b	جوملیا
نانوحباب اکسیژن	۱۳۹ ^a	۱۶/۰۸ ^a	۷/۱۸ ^a	۲۳/۲ ^a	۱۵/۴ ^a	۱/۱۳ ^b	۱۸۳ ^a	۱۹/۵ ^b	سامورایی
کاربرد	۱۴۴ ^a	۱۶/۴ ^a	۷/۳۳ ^a	۲۳/۷ ^a	۱۶/۰۳ ^a	۱/۱۵ ^a	۱۸۵ ^a	۲۰/۹ ^a	نانوحباب اکسیژن
عدم کاربرد	۱۵۱ ^a	۱۷/۴ ^a	۸/۰۸ ^a	۲۵/۵ ^a	۱۷/۷ ^a	۱/۱۱ ^b	۱۸۵ ^a	۲۵/۴ ^a	کاربرد
نانوکلات سیلیسیم	۱۳۳ ^b	۱۵/۰۶ ^b	۶/۴۳ ^b	۲۱/۵ ^b	۱۳/۸ ^b	۱/۱۷ ^a	۱۸۳ ^a	۱۶/۶ ^b	عدم کاربرد

در هر ستون (هر تیمار به صورت جداگانه) میانگین هایی که دارای حروف مشابه هستند، در سطح ۵٪ آزمون LSD با یکدیگر اختلاف معنی دار ندارند.

سیلیسیم منجر به افزایش غلظت کلروفیل در واحد سطح برگ می شود، احتمال می رود منجر به بهبود فتوسنتز در گیاهان شود و به دنبال آن افزایش سطح برگ اتفاق می افتد. محققان عنوان کرده اند ژنوتیپ های مختلف گل های رز شاخه بریده سطح برگ متفاوتی در هر برگچه را نشان

به کاهش رشد رویشی شده و به دنبال آن فتوسنتز و عملکرد نیز کاهش می یابد (دولتخواهی و همکاران، ۱۳۹۷). نخستین فرایندی که پس از کاهش محتوای آب گیاه اتفاق می افتد، کاهش توسعه سلولی و تقلیل توسعه برگ ها و ریشه ها است (دولتخواهی و همکاران، ۱۳۹۷). با توجه به آن که کاربرد

جدول ۷- مقایسه میانگین سه گانه اثر متقابل رقم × نانوحباب اکسیژن × نانوکلات سیلیسیم بر صفات فیزیولوژیک در ارقام رز سامورایی و جوملیا

رقم	تیماها		صفات اندازه‌گیری شده							
	نانوحباب اکسیژن	نانوکلات سیلیسیم	سطح برگ (cm ²)	کلروفیل a (mg.g ⁻¹)	کلروفیل b (mg.g ⁻¹)	کلروفیل کل (mg.g ⁻¹)	کارتونوئید (mg.g ⁻¹)	قند محلول (mg.g ⁻¹)	آنتوسیانین (μmol.g ⁻¹)	عمر گلجایی (روز)
جوملیا	عدم کاربرد	عدم کاربرد	۱۲۴ ^{cd}	۱۲/۰۷ ^c	۴/۷۰ ^c	۱۶/۷ ^d	۱۰/۱ ^c	۱/۱۹ ^a	۲۶/۵ ^c	۲۱ ^{cd}
	کاربرد	کاربرد	۱۲۹ ^{cd}	۱۷/۸ ^{ab}	۸/۹۴ ^a	۲۶/۷ ^{ab}	۱۹/۸ ^a	۱/۱۷ ^a	۳۴/۱ ^c	۲۳ ^{bc}
	عدم کاربرد	عدم کاربرد	۱۱۸ ^d	۱۴/۹ ^{bc}	۶/۰۵ ^{bc}	۲۱/۰۴ ^{cd}	۱۲/۶ ^{bc}	۱/۱۸ ^a	۸/۴۰ ^d	۳۱ ^a
	کاربرد	کاربرد	۱۳۲ ^{cd}	۱۶/۱ ^b	۷/۶۱ ^{ab}	۲۳/۷ ^{bc}	۱۶/۳ ^{ab}	۱/۱۳ ^b	۲۶/۶ ^c	۲۶ ^b
سامورایی	عدم کاربرد	عدم کاربرد	۱۴۷ ^{bc}	۱۵/۴ ^b	۶/۷۳ ^{abc}	۲۲/۱ ^{bc}	۱۴/۵ ^{abc}	۱/۱۷ ^a	۳۴/۷ ^{ab}	۱۵/۶ ^e
	کاربرد	کاربرد	۱۷۷ ^a	۲۰/۳ ^a	۸/۹۶ ^a	۲۹/۳ ^a	۱۹/۶ ^a	۱/۰۷ ^c	۳۳/۴ ^b	۱۷/۶ ^{de}
	عدم کاربرد	عدم کاربرد	۱۴۲ ^c	۱۷/۷ ^{ab}	۸/۲۴ ^{ab}	۲۶/۰۱ ^{abc}	۱۷/۷ ^{ab}	۱/۱۳ ^b	۳۵/۱ ^a	۱۷ ^e
	کاربرد	کاربرد	۱۶۶ ^{ab}	۱۵/۳ ^b	۶/۸۲ ^{abc}	۲۲/۲ ^{bc}	۱۵/۰۵ ^{abc}	۱/۰۷ ^c	۳۴/۶ ^{ab}	۱۶/۳ ^e

ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، طبق آزمون LSD فاقد تفاوت معنی‌دار هستند.

کارتونوئید داشت (جدول ۶). کاربرد هم‌زمان نانوحباب اکسیژن و نانوکلات سیلیسیم به ترتیب باعث افزایش ۱۴/۷ درصدی کلروفیل a، ۲۶/۱ درصدی کلروفیل b، ۱۸/۰۹ درصدی محتوای کلروفیل کل و ۲۷/۱ درصدی کارتونوئید نسبت به شاهد شد (داده‌ها ارائه نشده است).

در پژوهشی، اعمال نانوحباب اکسیژن محتوای کلروفیل a و b در برگ خیار را به ترتیب ۱/۳۴ و ۱/۴۴ برابر افزایش داده است (Dahrazma et al., 2019). Baram و همکاران (۲۰۲۲) بر این باورند که آبیاری با آب حاوی نانوحباب سبب افزایش محتوای کلروفیل a و b در کاهو (*Lactuca sativa* L.) شده است (Baram et al., 2022).

محققان بر این باورند که کاربرد سیلیسیم سبب افزایش غلظت کلروفیل به عنوان مهم‌ترین عامل مؤثر در فتوسنتز در هر واحد برگ گندم، خیار و گل‌های شاخه بریده رز (*R. chinensis* var. *minima*) می‌شود و محتوای کلروفیل a و b در برگ گندم نسبت به شاهد به ترتیب ۱۷/۱ و ۵۲/۱ برابر افزایش می‌یابد و از طرفی توانایی گیاه برای استفاده مؤثر از نور را به گونه‌ای که بتواند شدت‌های پایین و بالا را تحمل کند افزایش می‌دهد (مامرشپور و نظری دلجو، ۱۳۹۷؛ Asgari and Diyanat, 2021; Li et al., 2023; Jalilzadeh Khoie et al.,

می‌دهند، این در حالی است که سطح برگ می‌تواند تحت تأثیر شرایط آب و هوایی مانند شدت نور، دما و غلظت کربن دی‌اکسید قرار گیرد (Gao et al., 2012). با توجه به این موضوع که شرایط اقلیمی در بازه انجام این پژوهش برای تمامی تیمارها یکسان بوده است؛ ژنوتیپ می‌تواند نقش بسزایی در افزایش سطح برگ گل‌های رز شاخه بریده رقم‌های سامورایی و جوملیا داشت باشد.

محتوای کلروفیل و کارتونوئید برگ: استفاده از ارقام مختلف بر محتوای کلروفیل a و کل در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود (جدول ۵). اعمال نانوکلات سیلیسیم بر محتوای کلروفیل a و b، کلروفیل کل و کارتونوئید در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۵). برهمکنش رقم و نانوکلات سیلیسیم به ترتیب در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد بر محتوای کلروفیل b و کارتونوئید معنی‌دار بود (جدول ۵). رقم سامورایی در مقایسه با رقم جوملیا افزایش ۱۱/۳ درصدی بر محتوای کلروفیل a، ۱۰/۸ درصدی بر محتوای کلروفیل b، ۱۱/۳ درصدی بر محتوای کلروفیل کل و ۱۱/۸ درصدی بر محتوای کارتونوئید داشت (جدول ۶). تأثیر نانوکلات سیلیسیم نسبت به عدم کاربرد این تیمار؛ به ترتیب اختلاف ۱۳/۵، ۲۵/۶، ۱۸/۶ و ۲۸/۳ درصدی بر محتوای کلروفیل a، b، کلروفیل کل و

خالص فتوستتز کمک می‌کند، از عوامل دیگر می‌توان به تغییر ساختار کلروپلاست، هدایت روزنه‌ای و فعالیت آنزیم روبیسکو اشاره کرد (Li et al., 2023). Agarie و همکاران (۱۹۹۸) نشان دادند که کاهش مقدار کلروفیل در صورت کمبود سیلیسیم به دلیل کاهش فتوستتز است. دلیل این امر را می‌توان به نقش سیلیسیم در زنجیره فتوستتزی و ممانعت از تخریب کلروفیل نسبت داد (Agarie et al., 1998).

محتوای قند محلول کل: استفاده از ارقام مختلف، اعمال نانوحباب اکسیژن و نانوکلات سیلیسیم در سطح احتمال ۱ درصد بر محتوای قند محلول کل معنی‌دار شد (جدول ۵). برهمکنش دوگانه رقم و نانوکلات سیلیسیم و برهمکنش سه‌گانه رقم، نانوحباب اکسیژن و نانوکلات سیلیسیم در سطح احتمال ۱ درصد بر محتوای قند محلول کل معنی‌دار بود (جدول ۵).

تیمار نانوحباب اکسیژن سبب افزایش میزان قند محلول در خیار و گوجه‌فرنگی (*Lycopersicon esculentum* Cv. Zhongyan 998) نسبت به شاهد شده است (Liu et al., 2019). Li و همکاران (۲۰۲۳) عنوان کردند که محلول‌پاشی گندم با نانوسیلیس سبب افزایش محتوای قند محلول در برگ در مقایسه با شاهد شده است. افزایش قابل توجه و تدریجی در محتوای قندهای محلول کل با استفاده از نانوسیلیسیم در مقایسه با رزهای شاهد نیز توسط سرافی و همکاران (۲۰۱۹) گزارش شد (El-Serafy, 2019). رنجبر و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند که کاربرد سیلیکات پتاسیم، میزان قندهای محلول در دانه‌های پسته رقم بادامی ریز زرد را نسبت به تیمار شاهد افزایش داده است (Ranjbar et al., 2020).

از جمله محصولات اصلی فتوستتز قندها هستند که به‌عنوان تأمین‌کننده انرژی و بلوک‌های سازنده اجزای مختلف ساختاری سلول‌های گیاهی، بافت‌ها و اندام‌ها شناخته می‌شوند. علاوه بر این قندها به‌عنوان بخشی از مسیرهای مختلف سیگنال‌دهی با سایر بخش‌های سلولی تعامل دارند و بر بسیاری از فرآیندهای سلولی مهم در گیاهان تأثیر می‌گذارند (Li et al., 2023). طبق تحقیقاتی گیاهانی که با آب هوادهی شده آبیاری شدند

Baram و همکاران (۲۰۲۲) عنوان کردند که محتوای کارتنوئید فقط در کاهوی پرورش‌یافته در شرایط هوادهی ضعیف کاهش یافت (Baram et al., 2022).

از عوامل اصلی جذب انرژی نورانی، کلروفیل است (Lichtenthaler, 1987). کارتنوئیدها به‌عنوان رنگ‌دانه‌های فتوستتزی گیاهان هستند (Baram et al., 2022) و همچنین نقش مؤثری در فتوستتز دارند (Agarie et al., 1998). کلروفیل a رنگ‌دانه اصلی در فتوستتز است و کلروفیل b که در برخی گیاهان به‌خصوص گیاهان سبز یافت می‌شود، عامل دیگری است که به کلروفیل a در فتوستتز کمک می‌کند (Dahrazma et al., 2019). استفاده از آب غنی‌شده با نانوحباب اکسیژن می‌تواند عامل مؤثری در بهبود رشد رویشی و تولیدمثلی باشد. کارتنوئیدها در خارج از مواد زنده خاصیت فلورسانس ندارند، درحالی‌که چنین رفتاری را در کلروفیل a نشان می‌دهند به‌گونه‌ای که طول‌موج نوری را جذب می‌کنند که کلروفیل a قادر به جذب آن نیست. گزارش‌ها حاکی از آن است که کارتنوئیدها در گیاهان آبیاری شده با آب حاوی نانوحباب در مقایسه با گیاهان آبیاری‌شده با آب لوله‌کشی می‌تواند نقش مؤثری در حفاظت از کلروفیل‌ها داشته باشد (Dahrazma et al., 2019). از طرفی کارتنوئیدها علاوه بر عملکرد خود به‌عنوان رنگ‌دانه‌های فتوستتزی، دارای فعالیت آنتی‌اکسیدانی هستند و در پاسخ آنتی‌اکسیدانی گیاه نقش دارند. تنش اکسیداتیو ممکن است تحت شرایط کمبود اکسیژن القا شود، و پاسخ اکسیداتیو را تحریک کند و سبب تولید آنتی‌اکسیدان‌ها از جمله کارتنوئیدها شود. از این‌رو، کاهش غلظت کارتنوئید در برگ‌های کاهوی رشد‌یافته در خاک‌های رسی اکسیژن‌دهی شده؛ نشان‌دهنده نیاز کمتر به محافظت از سلول‌های فتوستتزی در برابر شرایط تنش است که ممکن است ناشی از کمبود اکسیژن در خاک باشد (Baram et al., 2022). از طرفی کاربرد سیلیسیم به دلیل رسوب در پهنای برگ و افزایش سطح برگ سبب افزایش غلظت کلروفیل در واحد سطح برگ می‌شود؛ در این حالت توانایی گیاه برای استفاده مؤثرتر از نور را بالا می‌برد (Li et al., 2023; Agarie et al., 1998)، و به افزایش نرخ

آنتوسیانیدین‌ها ساختارهای اساسی آنتوسیانین‌ها هستند. آنتوسیانیدین‌ها (آگلیکون‌ها) از یک حلقه معطر تشکیل شده‌اند که به یک حلقه هتروسیکلیک که حاوی اکسیژن است، توسط یک پیوند کربن-کربن به حلقه آروماتیک سوم پیوند می‌خورد (Konczak and Zhang, 2004). هنگامی که آنتوسیانیدین‌ها به شکل گلیکوزید خود به یک قند متصل می‌شوند به عنوان آنتوسیانین شناخته می‌شوند (Wrolstad *et al.*, 2005). این رنگدانه‌ها مسئول رنگ‌های براق نارنجی، صورتی، قرمز، بنفش و آبی در گل‌ها و میوه‌های برخی گیاهان هستند (Konczak and Zhang, 2004)، که پایداری آن‌ها تحت تأثیر عوامل متعددی مانند pH، ساختار شیمیایی، نور، میزان اکسیژن، وجود آنزیم‌ها، پروتئین‌ها و یون‌های فلزی است (Rein, 2005). با توجه به این موضوع که آنتوسیانین‌ها از ترکیب قند و ترکیبات حلقوی تشکیل می‌شوند، تشکیل آنتوسیانین در گیاهان معمولاً با تجمع قند در بافت همراه است و هر عاملی که میزان قند را در بافت افزایش دهد، اغلب تولید آنتوسیانین‌ها را در بافت‌ها بهبود می‌بخشد (Tavakoli and Asadi-Gharneh, 2020). نتایج حاکی از آن است که کاربرد سیلیسیم باعث افزایش تعداد و سطح برگ و میزان فتوسنتز در گیاهان می‌شود (Asgari and Diyanat, 2021; Baram *et al.*, 2022; Jalilzadeh Khoie *et al.*, 2024)، از طرفی قندها به‌عنوان محصولات اصلی فتوسنتز هستند (Lichtenthaler, 1987)؛ احتمالاً کاربرد نانوکلات سیلیسیم به دلیل افزایش میزان کربوهیدرات سبب افزایش میزان آنتوسیانین نیز می‌شود. آنتوسیانین‌ها ترکیباتی هستند که بسته به pH درون سلول با رنگ‌ها و شدت‌های متفاوتی ظاهر می‌شوند (Reezi *et al.*, 2018). با توجه به این موضوع که رنگ حقیقی آنتوسیانین بستگی به محل عامل هیدروکسیل در مولکول و pH محیط دارد، تیمار گیاهان با مواد حاوی سیلیسیم به دلیل تأثیر بر pH می‌تواند از عوامل اصلی کاهش میزان آنتوسیانین باشد (Reezi *et al.*, 2018). Alavi و همکاران (۲۰۲۳) عنوان کردند بیشترین محتوای آنتوسیانین گلبرگ گل‌های رز شاخه بریده هنگامی مشاهده شد که آبیاری با ایجاد فاصله (خشک شدن جزئی ریشه) همراه بود (Alavi *et al.*, 2023). احتمال می‌رود کاربرد نانوحباب اکسیژن به سبب

می‌تواند محتوای اکسیژن خاک در منطقه ریشه را افزایش دهند (Li *et al.*, 2023) که افزایش غلظت اکسیژن محلول در آب آبیاری می‌تواند نرخ فتوسنتز برگ را افزایش دهد (Bhattarai and Midmore, 2009). از طرفی سیلیسیم با تأثیر بر قدرت و نحوه قرارگیری برگ‌ها (Asgari and Diyanat, 2021)، فعالیت آنزیم رویسکو (Asgari and Diyanat, 2021) تغییر ساختار کلروپلاست، هدایت روزنه‌ای (Li *et al.*, 2023) و افزایش کارایی فتوسنتز II (Agarie *et al.*, 1998) می‌تواند به افزایش نرخ خالص فتوسنتز کمک کند (Li *et al.*, 2023) که به تبع آن میزان قند محلول کل موجود در گیاهان را افزایش می‌دهد (Jalilzadeh Khoie *et al.*, 2024).

غلظت آنتوسیانین گلبرگ: استفاده از رقم‌های مختلف در سطح احتمال ۱ درصد بر محتوای آنتوسیانین گلبرگ معنی‌دار بود (جدول ۵). برهمکنش‌های دوگانه رقم و نانوحباب اکسیژن و همچنین رقم و نانوکلات سیلیسیم در سطح احتمال ۱ درصد بر محتوای آنتوسیانین گلبرگ معنی‌دار شد (جدول ۵). اعمال نانوکلات سیلیسیم در رقم جوملیا سبب افزایش ۷۴/۱ درصدی محتوای آنتوسیانین گلبرگ در مقایسه با شاهد شد (داده‌ها ارائه نشده است). بیشترین محتوای آنتوسیانین در رقم سامورایی در زمان کاربرد نانوحباب اکسیژن مشاهده شد (جدول ۷).

Reezi و همکاران (۲۰۱۸) عنوان کردند اعمال سیلیسیم بر میزان آنتوسیانین گلبرگ در گل حنای گینه‌نو (Impatiens hawkeri W. Bull) اثر معنی‌داری نداشت (Reezi *et al.*, 2018). کاربرد سیلیسیم باعث افزایش رشد و جذب عنصرها و محتوای آنتوسیانین در گیاه چای ترش (Hibiscus sabdariffa L.) شد (Reezi *et al.*, 2018)، از طرفی محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم در گل‌های رز رقم بورلی واتسون بیشترین میزان آنتوسیانین را به همراه داشت (Jalilzadeh Khoie *et al.*, 2024). Rezai و همکاران (۲۰۲۳) عنوان کردند تفاوت‌های مشاهده شده در محتوای آنتوسیانین میان ارقام مختلف (سامورایی و جوملیا) به رنگ طبیعی گل‌ها در ژنوتیپ مربوط است (Rezai *et al.*, 2023).

عمر گلجایی می‌شود (Jalilzadeh Khoie et al., 2024). Nakazawa و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کردند کاربرد سیلیسیم عمر گلدانی گل‌های شاخه بریده ژربرا را طولانی می‌کند (Kazemi et al., 2012). بهبود طول عمر گل‌های شاخه بریده میخک (*Dianthus caryophyllus* L.)، داوودی (*Chrysanthemum morifolium* RAM.)، لیسیانثوس و رز به دلیل مکمل‌های سیلیسیم که باعث افزایش محتوای کلروفیل و کربوهیدرات کل می‌شود گزارش شده است (Kazemi et al., 2012; El-Serafy, 2019; Ali and Hassan, 2016; Asgari and Diyanat, 2021). طبق تحقیقات، جذب آب تأثیر به‌سزایی بر شادابی و عمر پس از برداشت بیشتر گل‌های شاخه بریده دارد، کاربرد سیلیسیم با کاهش نشت یونی و افزایش جذب آب و محتوای نسبی آب باعث حفظ شادابی گل و افزایش عمر گل‌های شاخه بریده لیلیوم شده است (مامرشپور و نظری دلجو، ۱۳۹۷).

با توجه به بررسی‌های صورت‌گرفته مطالعات زیادی بر تأثیر نانوحباب اکسیژن بر عمر پس از برداشت گیاهان در شرایط گلخانه‌ای یافت نشد؛ احتمال می‌دهیم تأثیر مثبت نانوحباب اکسیژن بر افزایش عمر پس از برداشت گل‌های رز شاخه بریده به دلیل آن است که آبیاری با آب حاوی نانوحباب سبب دسترسی سطوح اکسیژن محلول پایدار و یکنواخت به‌منظور سلامت ریشه، بهبود توسعه ریشه، افزایش جذب و استفاده از عناصر غذایی و نگهداری بهتر آب در محیط ریزوسفر می‌شود (Bhatarai and Midmore, 2009; Wu et al., 2019; Nakazawa et al., 2023). با توجه به این خواص، آبیاری با آب حاوی نانوحباب، تغذیه یکنواخت و بهتری را به ریزوسفر گیاه ارائه می‌دهد و در نهایت منجر به راندمان بالای مصرف کود و عملکرد بهتر گیاه می‌شود (Zhou et al., 2020). از جمله عناصری که جذب آن بسیار تأثیرگذار است؛ کلسیم است. کلسیم به‌عنوان یک ماده ضروری برای دیواره سلولی، با افزایش ترکیبات پلی‌ساکاریدی و پکتینی در بافت‌ها باعث افزایش سفتی دیواره سلولی شده و از تجزیه دیواره سلولی جلوگیری می‌کند (Poovaiah et al., 1987). کمبود کلسیم،

حضور اکسیژن در ساختار آنتوسیانین و همچنین به سبب آن که اکسیژن از عوامل تأثیرگذار در پایداری آنتوسیانین‌هاست موجب افزایش غلظت آنتوسیانین گلبرگ‌ها شود.

عمر پس از برداشت: استفاده از ارقام مختلف و اثر نانوحباب اکسیژن بر عمر پس از برداشت گل‌های رز شاخه بریده در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۵). تأثیر برهمکنش دوگانه رقم و نانوحباب اکسیژن و همچنین برهمکنش نانوحباب اکسیژن و نانوکلات سیلیسیم بر عمر پس از برداشت در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۵). رقم جوملیا در مقایسه با رقم سامورایی ۵۲/۵ درصد عمر پس از برداشت بیشتری را نشان داد (جدول ۶). تیمار نانوحباب اکسیژن افزایش ۱۵/۸ درصدی بر عمر پس از برداشت در مقایسه با تیمار شاهد را نشان داد (جدول ۶). برهمکنش نانوحباب اکسیژن و نانوکلات سیلیسیم سبب افزایش ۱۵/۴ درصدی عمر پس از برداشت نسبت به شاهد شد (داده‌ها ارائه نشده است). بیشترین عمر گل به تیمار نانوحباب اکسیژن در رقم جوملیا و کمترین آن به تیمار شاهد رقم سامورایی تعلق داشت (جدول ۷).

یکی از مهم‌ترین عواملی که بر عمر و کیفیت گل‌های شاخه بریده تأثیر می‌گذارد؛ تنش اکسیداتیو است. تنش اکسیداتیو بر مکانیسم‌های سلولی و لپیدهای غشایی تأثیر می‌گذارد و پیری را تسریع می‌کند، به همین دلیل اجتناب یا کاهش تنش اکسیداتیو برای افزایش طول عمر گل‌ها حیاتی است؛ بنابراین، یک سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی مناسب می‌تواند عمر مفید گل‌ها را افزایش دهد. گزارش شده است که نانومواد مختلف می‌توانند پاسخ‌های مثبت (مانند رشد و توسعه بهتر) و تغییرات در متابولیسم در گیاهان را القا کنند که می‌تواند به تحمل شرایط تنش مختلف کمک کند (Seddon et al., 2012). Nakazawa و همکاران (۲۰۲۳) عنوان کردند کاربرد نانوحباب اکسیژن سبب افزایش عمر گلجایی در گل‌های شاخه بریده داوودی (*Chrysanthemum morifolium* Ramat.) شده است (Nakazawa et al., 2023). در گل‌های بریده رز، کاربرد سیلیسیم، با به تأخیرانداختن تجزیه کلروفیل، باعث افزایش

افزایش داد. برهمکنش نانوحباب اکسیژن و نانوکلات سیلیسیم تأثیر به‌سزایی بر تعداد روزنه، تعداد روزنه‌های باز و نسبت روزنه‌های باز به بسته در برگ گل‌های شاخه‌بریده رز رقم جوملیا داشت. بیشترین مساحت و عرض روزنه در گل‌های شاخه بریده رقم سامورایی در تیمار نانوحباب اکسیژن و نانوکلات سیلیسیم مشاهده شد. کاربرد نانوکلات سیلیسیم بیشترین محتوای کلروفیل a، b و کل در رقم سامورایی و بیشترین محتوای کارتنوئید در رقم جوملیا را به همراه داشت. باتوجه‌به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان عنوان کرد اثر تیمارهای مختلف بر مورفولوژی روزنه به ژنوتیپ‌های گیاهی بستگی دارد. استفاده از نانوحباب اکسیژن می‌تواند به عنوان یک راهکار مناسب جهت بهبود افزایش عمر پس از برداشت گل‌های رز شاخه بریده مورد توجه قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از زحمات سرکار خانم مهندس نسیم آقامحمدی و جناب آقای مهندس حمید رفیعی که در اجرای مراحل طرح همکاری نمودند، قدردانی می‌شود.

گونه‌های فعال اکسیژن را افزایش می‌دهد و باعث ایجاد تنش اکسیداتیو و آسیب به غشاها می‌شود. علاوه‌براین، آسیب اکسیداتیو دیواره سلولی را تخریب می‌کند، شکل بافت را دچار اختلال می‌کند و اتلاف آب را افزایش می‌دهد که به نوبه خود منجر به پژمردگی برگ و کاهش عمر مفید محصول برداشت شده می‌شود (Da silva et al., 2021). با توجه به آن که اعمال آب آبیاری به همراه نانوحباب اکسیژن سبب بهبود جذب و کارایی عناصر غذایی در گیاهان می‌شود (Zhou et al., 2020) احتمال می‌رود اعمال نانوحباب اکسیژن در بستر کشت سبب بهبود جذب عنصر کلسیم شود و به دنبال آن افزایش عمر گلجایی قابل مشاهده است.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد نانوحباب اکسیژن در بستر، سبب افزایش عمر پس از برداشت گل‌های رز شاخه بریده رقم جوملیا شد. این در حالی است که، محتوای قند محلول کل در با اعمال نانوحباب اکسیژن در رقم جوملیا نیز افزایش یافت. کاربرد نانوحباب اکسیژن علاوه بر افزایش عمر پس از برداشت، سطح برگ و غلظت آنتوسیانین گلبرگ را نیز

منابع

- بیات، حسن، نعمتی، سید حسینی، و سلاح‌ورزی، یحیی (۱۳۹۱). تأثیر سیلیسیم بر رشد و برخی خصوصیات فیزیولوژیک اطلسی ایرانی (*Petunia hybrida*). نشریه علوم باغبانی، ۲۶، ۱۰-۱۶.
- حاتمیان، منصوره، عرب، مصطفی، و روزبان، محمودرضا (۱۳۹۳). مطالعه رفتار روزنه‌ای دو رقم رز در شدت‌های مختلف نور. مجله به‌زراعی کشاورزی، ۱۷، ۱-۱۱.
- دولتخواهی، علی، شور، محمود، بنایان اول، محمد، تهرانی‌فر، علی، و علیزاده، امین (۱۳۹۷). تأثیر سیلیسیم بر ویژگی‌های کیفی و بیوشیمیایی گل رز بریدنی در شرایط تنش آبی. مجله کشت علوم فنون و گلخانه‌ای، ۹، ۱-۱۱.
- مامرشپور، عثمان، و نظری دلجو، محمد جواد (۱۳۹۷). ماندگاری و واکنش فیزیولوژیکی گل شاخه بریده لیلیوم اوریتال به عنصر شبه ضروری سیلیسیم در کشت بدون خاک. علوم باغبانی ایران، ۵۰، ۱۰۵-۱۴۱.
- نیکبخت، علی، و اشرفی، نبی‌الله (۱۴۰۰). گل‌های شاخه بریده اصول علمی و عملی پرورش. جلد ۱، جهاد دانشگاهی صنعتی اصفهان، اصفهان.

Agarie, S., Hanaoka, N., Ueno, O., Miyazaki, A., Kubota, F., Agata, W., & Kaufman, P. B. (1998). Effects of silicon on tolerance to water deficit and heat stress in rice plants (*Oryza sativa* L.), monitored by electrolyte leakage. *Plant Production Science*, 1(2), 96-103. <https://doi.org/10.1626/pps.1.96>

Agarwal, A., Ng, W. J., & Liu, Y. (2011). Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment. *Chemosphere*, 84(9), 1175-1180. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.05.054>

- Ali, E. F. & Hassan, F. A. (2016). Supplemental effects of silicon nutrition on growth, quality and some physiological characters of potted chrysanthemum grown in greenhouse. *Acta Scientiarum Polonorum. Hortorum Cultus*, 15(4), 85-98.
- Alavi, S. M., Kamali, M., Selahvarzi, Y., & Ansari, S. (2023). Deficit irrigation strategies (PRD, SDI) and titanium nanoparticles improve water use efficiency and flower quality in greenhouse-grown cut roses. *Scientific Reports*, 13(1), 18019. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45042-1>
- Asgari, F. & Diyanat, M. (2021). Effects of silicon on some morphological and physiological traits of rose (*Rosa chinensis* var. minima) plants grown under salinity stress. *Journal of Plant Nutrition*, 44(4), 536-549. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1845367>
- Baram, S., Weinstein, M., Evans, J. F., Berezkin, A., Sade, Y., Ben-Hur, M., Bernstein, N., & Mamane, H. (2022). Drip irrigation with nanobubble oxygenated treated wastewater improves soil aeration. *Scientia Horticulturae*, 291, 110550. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110550>
- Bhatarai, S. P. & Midmore, D. J. (2009). Oxygenation enhances growth, gas exchange and salt tolerance of vegetable soybean and cotton in a saline vertisol. *Journal of Integrative Plant Biology*, 51(7), pp.675-688. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2009.00837.x>
- Dahrazma, B., Naghedinia, A., Ghasemian Gorji, H., & Saghravani, S. F. (2019). Morphological and physiological responses of *Cucumis sativus* L. to water with micro-nanobubbles. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 21(1), 181-192. <https://doi.org/jast.modares.ac.ir/article-23-15964-en.html>
- Daneshmand, B., Gholami, M., Etemadi, N., & Ehtemam, M. H. (2024). The water relation parameters are associated with the genotypic differences in the vase life of cut rose flowers. *Postharvest Biology and Technology*, 211, 112829. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2024.112829>
- Da silva, D. L., de Mello Prado, R., Tenesaca, L. F. L., da Silva, J. L. F., & Mattiuz, B. H. (2021). Silicon attenuates calcium deficiency by increasing ascorbic acid content, growth and quality of cabbage leaves. *Scientific Reports*, 11(1), 1770. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80934-6>
- Datnoff, L. E., Snyder, G. H., & Korndorfer, G. H. (2001). Silicon in Agriculture. Elsevier.
- Domec, J. C. (2011). Let's not forget the critical role of surface tension in xylem water relations. *Tree Physiology*, 31(4), 359-360. doi.org/10.1093/treephys/tpr039
- Ebina, K., Shi, K., Hirao, M., Hashimoto, J., Kawato, Y., Kaneshiro, S., Morimoto, T., Koizumi, K., & Yoshikawa, H. (2013). Oxygen and air nanobubble water solution promote the growth of plants, fishes, and mice. *PLoS One*, 8, 65339. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0065339>
- El-Serafy, R. S. (2019). Silica nanoparticles enhance physio-biochemical characters and postharvest quality of *Rosa hybrid* L. cut flowers. *Journal of Horticultural Research*, 27, 47-54. <https://doi.org/10.2478/johr-2019-0006>
- Gao, M., Van der Heijden, G. W. A. M., Vos, J., Eveleens, B. A., & Marcelis, L. F. M. (2012). Estimation of leaf area for large scale phenotyping and modeling of rose genotypes. *Scientia Horticulturae*, 138, 227-234. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.02.014>
- Gupta, J. & Dubey, R. K. (2018). Factors affecting post-harvest life of flower crops. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 7(1), 548-557. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.701.065>
- Irigoyen, J. J., Einerich, D. W., & Sanchez-Diaz, M. (1992). Water stress induced changes in concentrations of proline and total soluble sugars in nodulated alfalfa (*Medicago sativa*) plants. *Physiologia Plantarum*, 84(1), 55-60. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1992.tb08764.x>
- Jalilzadeh Khoie, E., Jabbarzadeh, Z., Norouzi, P., Barin, M., & Razavi, M. (2024). Silicon spray affect floricultural traits and leaf elemental nutrient concentrations of Rose 'Beverly Watson'. *Journal of Plant Nutrition*, 47(1), 145-156. <https://doi.org/10.1080/01904167.2023.2262513>
- Jost, D., Winter, J., & Gallert, C. (2011). Water and oxygen dependence of *Pseudomonas putida* growing in silica sand capillary fringes. *Vadose Zone Journal*, 10(2), 532-540. <https://doi.org/10.2136/vzj2010.0092>
- Kazemi, M., Gholami, M., & Hassanvand, F. (2012). Effects of silicon on antioxidative defense system and membrane lipid peroxidation in gerbera cut flower. *Asian Journal of Biochemistry*, 7, 171-176. <https://doi.org/10.3923/ajb.2012.171.176>
- Kamenidou, S., Cavins, T. J., & Marek, S. (2010). Silicon supplements affect floricultural quality traits and elemental nutrient concentrations of greenhouse produced gerbera. *Scientia Horticulturae*, 123(3), 390-394. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2009.09.008>
- Koentjoro, Y., Sukendah Purwanto, E., & Purnomo, D. (2020). Stomatal behaviour of soybean under drought stress with silicon application. *Annals of Agri-Bio Research*, 103-109.
- Konczak, I. & Zhang, W. (2004). Anthocyanins—more than nature's colours. *Journal of Biomedicine and Biotechnology*, 2004(5), 239.
- Kumari, S., Pradhan, P., Yadav, R., & Kumar, S. (2018). Hydroponic techniques: A soilless cultivation in agriculture. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7(1S), 1886-1891.
- Lichtenthaler, H. K. (1987). Chlorophyll fluorescence signatures of leaves during the autumnal chlorophyll breakdown.

- Journal of Plant Physiology*, 131(1-2), 101-110. [https://doi.org/10.1016/S01761617\(87\)80271-7](https://doi.org/10.1016/S01761617(87)80271-7).
- Li, Y., Xi, K., Liu, X., Han, S., Han, X., Li, G., Yang, L., Ma, D., Fang, Z., Gong, S., & Zhu, Y. (2023). Silica nanoparticles promote wheat growth by mediating hormones and sugar metabolism. *Journal of Nanobiotechnology*, 21(1), 2. <https://doi.org/10.1186/s12951-022-01753-7>.
- Liu, Y., Zhou, Y., Wang, T., Pan, J., Zhou, B., Muhammad, T., Zhou, C., & Li, Y. (2019). Micro-nano bubble water oxygation: Synergistically improving irrigation water use efficiency, crop yield and quality. *Journal of Cleaner Production*, 222, 835-843. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.208>
- Mali, M. & Aery, A. N. C. (2008). Silicon effects on nodule growth, dry-matter production, and mineral nutrition of cowpea (*Vigna unguiculata*). *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 171(6), 835-840. <https://doi.org/10.1002/jpln.200700362>
- Nakazawa, R., Tanaka, A., Hata, N., Minagawa, H., & Harada, E. (2023). Nanobubbles in vase water inhibit transpiration and prolong the vase life of cut chrysanthemum flowers. *Plant-Environment Interactions*, 4(6), 309-316. <https://doi.org/10.1002/pei3.10124>
- Nazaran, M. H. (2012). Khazra Patent Article: Chelate Compounds. Google Patents.
- Poovaiah, B. W., Reddy, A. S. N., & Leopold, A. C. (1987). Calcium messenger system in plants. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 6(1), 47-103. <https://doi.org/10.1080/07352688709382247>
- Ranjbar, P., Nazarideljou, M. J., & Hoseinzadeh, A. (2020). Effect of Nano-silicon and imidacloprid foliar application on morpho-physiological characteristics of gerbera cut flower and its reaction to whitefly under greenhouse conditions. *Plant Productions*, 43(2), 295-308. <https://doi.org/10.22055/ppd.2019.27344.1662>
- Reezi, S., Mohammadi, L., & Barzegar, R. (2018). Increasing nutrient elements absorption and photosynthetic pigments by silicon spray in New Guinea impatiens (*Impatiens hawkeri*) in soilless conditions. *Iranian Journal of Horticultural Science*, 49(1).
- Rezai, S., Nikbakht, A., Zarei, H., & Sabzalian, M. R. (2023). Physiological, biochemical, and postharvest characteristics of two cut rose cultivars are regulated by various supplemental light sources. *Scientia Horticulturae*, 313, 111934. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.111934>
- Rein, M. (2005). Copigmentation reactions and color stability of berry anthocyanins. Doctoral dissertation, Helsingin yliopisto.
- Romero-Aranda, R., Canto-Garay, R., & Martinez, P. F. (1994). Distribution and density of stomata in two cultivars of *Gerbera jamesonii* and its relation to leaf conductance. *Scientia Horticulturae*, 58(1-2), 167-173. [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(94\)90137-6](https://doi.org/10.1016/0304-4238(94)90137-6)
- Savvas, D. & Ntatsi, G. (2015). Biostimulant activity of silicon in horticulture. *Scientia Horticulturae*, 196, 66-81. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.010>
- Seddon, J. R., Lohse, D., Ducker, W. A., & Craig, V. S. (2012). A deliberation on nanobubbles at surfaces and in bulk. *ChemPhysChem*, 13(8), 2179-2187. <https://doi.org/10.1002/cphc.201100900>
- Song, J., Li, Y., Hu, J., Lee, J., & Jeong, B. R. (2021). Pre-and/or postharvest silicon application prolongs the vase life and enhances the quality of cut peony (*Paeonia lactiflora* Pall.) flowers. *Plants*, 10(8), 1742. <https://doi.org/10.3390/plants10081742>
- Sun, Y., Xu, J., Miao, X., Lin, X., Liu, W., & Ren, H. (2021). Effects of exogenous silicon on maize seed germination and seedling growth. *Scientific Reports*, 11(1), 1014. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79723-y>
- Tavakoli, M. & Asadi-Gharneh, H. A. (2020). Assess effect of foliar application of seaweed extract and amino acids on morpho-physiological characteristics of *Gerbera jamesonii* var. Stanza cut flowers. *Journal of Crop Nutrition Science*, 6(1), 1-11.
- Torabi, F., Majd, A., & Enteshari, S. (2015). The effect of silicon on alleviation of salt stress in borage (*Borago officinalis* L.). *Soil Science and Plant Nutrition*, 61(5), 788-798. <https://doi.org/10.1080/00380768.2015.1005540>
- Wagner, G. J. (1979). Content and vacuole/extravacuole distribution of neutral sugars, free amino acids, and anthocyanin in protoplasts. *Plant Physiology*, 64(1), 88-93. <https://doi.org/10.1104/pp.64.1.88>
- Wrolstad, R. E., Durst, R. W., & Lee, J. (2005). Tracking color and pigment changes in anthocyanin products. *Trends in Food Science and Technology*, 16(9), 423-428. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2005.03.019>
- Wu, Y., Lyu, T., Yue, B., Tonoli, E., Verderio, E. A., Ma, Y., & Pan, G. (2019). Enhancement of tomato plant growth and productivity in organic farming by agri-nanotechnology using nanobubble oxygation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(39), 10823-10831. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b04117>
- Zhou, Y., Bastida, F., Zhou, B., Sun, Y., Gu, T., Li, S., & Li, Y. (2020). Soil fertility and crop production are fostered by micro-nano bubble irrigation with associated changes in soil bacterial community. *Soil Biology and Biochemistry*, 141, 107663. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107663>
- Zhou, Y., Zhou, B., Xu, F., Muhammad, T., & Li, Y. (2019). Appropriate dissolved oxygen concentration and application stage of micro-nano bubble water oxygation in greenhouse crop plantation. *Agricultural Water Management*, 223, 105713. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105713>

Enrichment of nutrient solution with oxygen nanobubble and foliar spraying of silicon nano chelate on some physiological characteristics in cut roses (Samurai and Jumilia)

Roghayeh Hossein Hashemi¹, Ali Nikbakht^{1*}, Hamed Aalipour, and² Mohammad Hossain Ehtemam³

¹Department of Horticulture, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

²Department of Horticulture and Landscape, College of Agriculture, Tabriz University, Tabriz, Iran

³Department of Agronomy and Plant Breeding, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

(Received: 2024/06/01, Accepted: 2024/07/22)

Abstract

In cut rose flowers, petals senescence not only confines the ornamental value but also imposes a significant economic loss. Therefore, delaying the senescence of cut rose flower petals senescence is very significant to acquire high commercial benefit. In this regard, research was conducted to investigate the effect of the application of the new technology of enrichment with oxygen nanobubbles and silicon nano chelate in the conditions of soilless cultivation on the physiological indicators, the stomatal condition, and the vase life of cut roses. The current research is a factorial split-plot experiment in the form of a randomized complete block design with three factors, including two cut rose cultivars (Samurai and Jumilia), nutrient solution enrichment with oxygen nanobubbles (with oxygen nanobubble concentrations of 0 and 20 mg/liter and for 4 minutes per hour), and foliar spraying of 2% silicon nanochelate (with a concentration of 0 and 2 ml L⁻¹ and an interval of 10 days) with three repetitions. Application of silicon nanochelate compared to the control treatment resulted in 13.4%, 15.6%, 25.6%, 18.3% and 28.3% improvement in leaf area, chlorophyll a, chlorophyll b, total chlorophyll and carotenoid content, respectively. Interaction of oxygen nanobubble and silicon nanochelate content of chlorophyll a (14.7%), chlorophyll b (26.1%), total chlorophyll (18%), carotenoids (27.2%), stomatal area (7.41%), and diameter increased stomata (4.48%), stomata length (7.30%), stomata width (6.49%), and the ratio of the number of open to closed stomata (53%) compared to the control. The use of oxygen nanobubbles had a more pronounced effect compared to silicon nanochelate, which can be introduced as an indicator treatment for increasing the post-harvest life and quality of rose-cut flowers.

Keywords: Vase life, Stomatal condition, Hydroponics, Anthocyanin content, Total soluble sugar

Corresponding author, Email: anikbakht@iut.ac.ir