Plant Prod., 2025, 48(3), 363- 381
https://plantproduction.scu.ac.ir/
ISSN (P): 2588-543X; **ISSN (E):** 2588-5979
Doi: 10.22055/ppd.2024.47877.2199
Received: 29 August 2024
Accepted: 08 September 2024

Plant Productions

Research Article

The effect of foliar application of gamma-aminobutyric acid (GABA) and forchlorfenuron (CPPU) on physiological and biochemical characteristics of strawberry cv. Camarosa

Naeimeh Soukht Saraei[1], Feryal Varasteh[2*], Hamid Reza Sadeghipour[3]

1. Ph.D. Student, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.
2. Assistant Professor, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.
3. Associate Professor, Department of Biology, Faculty of Sciences, Golestan University, Gorgan, Iran.

Citation: Soukht Saraei, N., Varasteh, F., Sadeghipour, H.R. (2025). The effect of foliar application of gamma-aminobutyric acid (GABA) and forchlorfenuron (CPPU) on physiological and biochemical characteristics of strawberry cv. Camarosa. *Plant Productions*, 48(3), 363 - 381.

Abstract

Introduction

Strawberry is a globally valued fruit, and enhancing its quality without reliance on harmful chemicals is a critical goal. Gamma-aminobutyric acid (GABA), a non-protein amino acid, influences plant growth, the tricarboxylic acid cycle, and both primary and secondary metabolism while improving responses to biotic and abiotic stresses. Plant growth regulators such as cytokinins, including synthetic compounds like forchlorfenuron (CPPU), can enhance photosynthesis, cell division, and overall plant performance, particularly if applied during early fruit development.

Materials and Methods

This study evaluated the effects of foliar applications of GABA (0, 10, 20 mM) and CPPU (0, 5, 10 mg l^{-1}) on Camarosa strawberry plantlets, grown in Ramian County, Golestan province, Iran (UTM: 318446, 4092385) in October 2022. Treatments were applied at flowering and repeated 10 days later for GABA, and once at flowering for CPPU, using a randomized complete blocks design with three replications. Fruits were harvested at 75% surface redness and assessed for root volume and weight, total sugar, leaf photosynthetic pigments, fruit dimensions and shape, malformed fruit percentage, firmness, color, yield, and endogenous cytokinin. Data were analyzed by ANOVA (SAS 9.1), and means were compared using Duncan's multiple range test ($p < 0.01$).

Results and Discussion

GABA application, particularly at 20 mM, significantly increased root volume and weight, leaf carotenoid content, chlorophyll b content, fruit firmness and the total harvested fruit weight at the

* **Corresponding Author:** Feryal Varasteh
E-mail: f.varasteh@gau.a.ir

© 2025 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1% significance level. It also significantly enhanced total leaf chlorophyll and reduced the percentage of malformed fruits at the 5% significance level. Specifically, 20 mM GABA increased total harvested fruit weight by 17%. However, GABA had no significant effect on leaf area, chlorophyll a content, total leaf sugar, or most fruit dimensional indices.
CPPU application significantly increased root volume and weight, leaf area, carotenoid content, fruit length, firmness, and reduced malformed fruit percentage ($p< 0.01$), and also affected chlorophyll a, total chlorophyll, and fruit length-to-diameter ratio at the 5% level, sugar, or most fruit dimensional indices. Notably, 10 mg L^{-1} CPPU enhanced root volume and weight by 107 % and 59 %, respectively, versus control. The highest fruit length (65.51 mm) and fruit length-to-diameter ratio (1.69) were obtained in plants sprayed with 10 mg L^{-1} CPPU. The highest fruit firmness (1.96 Ncm^{-2}) was observed in the 20 mM GABA treatment. Both GABA and CPPU increased total leaf chlorophyll, with maxima in 20 mM GABA (1.384 mg g^{-1}) and 10 mg L^{-1} CPPU (1.430 mg g^{-1}). Malformed fruit incidence was lowest with 10 mg L^{-1} CPPU. Both GABA and CPPU treatments significantly improved fruit color brightness and total sugar content.

Conclusion

Foliar applications of GABA and CPPU act as regulators of growth and development in strawberry, enhancing yield and fruit quality. Applying 20 mM GABA and 10 mg L^{-1} CPPU to Camarosa strawberries is recommended to produce high-quality, well-formed, and long-lasting fruit.

Keywords: Cytokinin, Fruit firmness, Fruit total sugar, Photosynthetic pigments

تولیدات گیاهی، ۱٤۰٤، ٤۸(۳)، ۳٦۳ -۳۸۱
https://plantproduction.scu.ac.ir/
ISSN (P): 2588-543X; **ISSN (E):** 2588-5979
Doi: 10.22055/ppd.2024.47877.2199
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/ ۰۶ /۰۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/ ۰۶/۱۸

تولیدات گیاهی
مقاله پژوهشی

اثر کاربرد برگی گاما آمینوبوتیریک اسید (GABA) و فورکلرفنورون (CPPU) بر ویژگی‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی توت‌فرنگی رقم کاماروسا

نعیمه سوخت سرایی[۱]، فریال وارسته *[۲]، حمیدرضا صادقی پور[۳]

۱- دانشجوی دکتری گروه علوم باغبانی، دانشکدهٔ تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
۲- استادیار گروه علوم باغبانی، دانشکدهٔ تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
۳- دانشیار گروه زیست‌شناسی، دانشکدهٔ علوم، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران.

چکیده

کاربرد ترکیبات طبیعی و ایمن برای انسان و محیط زیست، نقش مهمی در بهبود عملکرد و کیفیت توت‌فرنگی دارد. یکی از مهم‌ترین و گسترده‌ترین ارقام توت‌فرنگی مورد کشت در جهان رقم کاماروسا است که به دلیل تولید اول فصل، عملکرد بالا، میوه‌های جذاب همراه با سفتی بالا و کیفیت حمل و نقل و عمر پس از برداشت نسبتاً بالا، یک رقم مناسب برای تولیدکنندگان است. در این پژوهش بوته‌های توت‌فرنگی رقم کاماروسا در گلخانه‌ای تونلی با پوشش پلاستیک پلی‌اتیلنی و بدون استفاده از سیستم گرمایشی در شهرستان رامیان، استان گلستان در گلدان‌های پلی‌اتیلنی با بستر کشت کوکوپیت و پرلیت در آبان‌ماه سال ۱٤۰۰ کشت شدند. بوته‌ها در دو مرحله (ابتدای گلدهی و ۱۰ روز بعد) با گاما آمینوبوتیریک اسید (GABA) با غلظت صفر، ۱۰ و ۲۰ میلی‌مولار و یک مرحله (ابتدای گلدهی) با فورکلرفنورون (CPPU) با غلظت صفر، ۵ و ۱۰ میلی‌گرم در لیتر محلول‌پاشی شدند. نتایج نشان داد که محلول‌پاشی GABA و CPPU توانست به‌طور معنی‌داری رشد و نمو ریشه، سطح برگ، کلروفیل کل، کاروتنوئید برگ، سفتی میوه و مجموع وزن میوه برداشت شده را افزایش و درصد میوهٔ بدشکل را کاهش دهد. تیمار GABA ۲۰ میلی‌مولار مجموع وزن میوه برداشت شده را ۱۷ درصد افزایش داد و بیشترین سفتی میوه (۱/۹٦ نیوتن بر سانتی‌متر مربع) در بوته‌های محلول‌پاشی شده با ۲۰ میلی‌مولار GABA مشاهده شد. میزان کلروفیل کل برگ با افزایش غلظت GABA و CPPU افزایش یافت و بیشترین میزان کلروفیل کل برگ (۱/۳۸٤ میلی‌گرم بر گرم) در تیمارهای ۲۰ میلی‌مولار GABA و ۱۰ میلی‌گرم در لیتر CPPU (۱/٤۳۰ میلی‌گرم بر گرم) ثبت شد. تیمار ۱۰ میلی‌گرم در لیتر CPPU به ترتیب ۱۰۷ و ۵۹ درصد افزایش حجم و وزن ریشه را سبب شد. بیشترین طول میوه (٦۵/۵۱ میلی‌متر) و نسبت طول به قطر میوه (۱/٦۹) در بوته‌های محلول‌پاشی شده با ۱۰ میلی‌گرم در لیتر CPPU به‌دست آمد. همچنین هر دو تیمار GABA و CPPU بر شاخص درخشندگی رنگ میوه و قند کل میوه اثر معنی‌داری داشتند. در این میان، تیمار GABA بر طول، قطر، نسبت طول به قطر میوه و قند برگ در زمان برداشت اثر معنی‌داری نداشت. به‌علاوه تیمار CPPU نتوانست قطر میوه، قند برگ و مجموع وزن میوه برداشت شده را در زمان برداشت تحت تأثیر قرار دهد. محلول‌پاشی CPPU بر محتوای سیتوکینین میوه اثر

نویسنده مسئول: فریال وارسته
رایانامه: f.varasteh@gau.a.ir

معنی‌داری داشت و بیشترین مقدار این تنظیم کنندهٔ رشد گیاهی در تیمار ۱۰ میلی‌گرم در لیتر CPPU ثبت شد. در نهایت، محلول‌پاشی بوته‌های توت‌فرنگی رقم کاماروسا با ۲۰ میلی‌مولار GABA و ۱۰ میلی‌گرم در لیتر CPPU به‌منظور تولید میوه با کیفیت و ماندگاری بالا توصیه می‌شود.

کلید واژه‌ها: رنگیزه‌های فتوسنتزی، سفتی میوه، سیتوکینین، قند کل میوه

مقدمه

توت‌فرنگی (*Fragaria × ananasa*) یکی از میوه‌هایی است که به دلیل عطر و طعم، ظاهر زیبا، جذابیت رنگ و ارزش غذایی دارای محبوبیت جهانی است (Aghaee fard *et al*., 2015). این میوه دارای ترکیبات متنوعی به‌ویژه ویتامین ث و مواد معدنی است و از نظر تغذیه‌ای و پزشکی بسیار ارزشمند می‌باشد. منبع خوبی از منگنز، ید، منیزیم، مس، آهن و فسفر و حاوی ترکیبات فنلی و آنتوسیانین نیز می‌باشد. همچنین، غنی از آنتی‌اکسیدان‌های طبیعی بوده و فعالیت رادیکال‌های آزاد را کاهش می‌دهد (Miller *et al*., 2019, Soukht Saraei *et al*., 2024). یکی از مهم‌ترین و گسترده‌ترین ارقام مورد کشت در جهان رقم کاماروسا است که طی یک سری برنامه‌های به‌نژادی دانشگاه کالیفرنیا به‌دست آمد و به‌عنوان یک رقم روز کوتاه معرفی شد (Hadadinejad *et al*., 2020). این رقم دارای میوهٔ مخروطی و زودرس بوده، سفتی میوهٔ آن زیاد و بافت بیرونی و درونی آن قرمز رنگ است. این رقم نسبت به باران مقاوم است، کیفیت حمل‌ونقل و جابه‌جایی خوبی دارد و در مناطق نیمه‌گرمسیری و خشک با دورهٔ باردهی طولانی‌تر، گزینه‌ای مناسب برای تولیدکنندگان به شمار می‌آید (Nankali *et al*., 2014).

به‌طور معمول برای تضمین عملکرد و کیفیت این میوه، یک برنامه محلول‌پاشی گسترده تنظیم می‌شود که گاهی اوقات تهدیدی جدی برای سلامت مصرف‌کننده است. با این‌حال، توسعهٔ راهبردهای سازگار با محیط زیست، اقتصادی و ایمن‌تر همیشه در کانون توجه بخش تحقیق و توسعه بوده است (Anwar *et al*., 2018). گاما آمینوبوتریک اسید (GABA) یک اسید آمینهٔ غیر-پروتیئنی چهار کربنه بوده که با سازوکار تنظیم‌کنندگی بر فرآیندهای مختلف گیاه اثر می‌گذارد. این ترکیب علاوه بر تنظیم فعالیت‌های رشدی گیاه، در حفظ تعادل کربن-نیتروژن، فعالیت چرخهٔ کربس، تولید متابولیت-های اولیه و ثانویه و واکنش به تنش‌های زیستی و غیرزیستی نقش دارد و می‌تواند به‌سرعت و به مقدار زیاد در برابر افزایش دی‌اکسیدکربن و تنش‌هایی مانند آسیب‌های مکانیکی، شوری، کمبود اکسیژن، خشکی و درجه حرارت‌های پایین در گیاه انباشته شود (Abd El-Gawad *et al*., 2021). بر اساس مطالعات انجام شده در سلول‌های گیاهی، GABA توسط دو مسیر مختلف آنزیمی ساخته می‌شود: مسیر اول بیوسنتز GABA (مسیر اصلی تولید آن در بسیاری از گیاهان) از طریق گلوتامات و تبدیل آن به سوکسینات است که به مسیر گابا-شانت معروف است و با وساطت آنزیم گلوتامات دکربوکسیلاز فعال می‌شود. مسیر دوم از طریق مسیر تجزیهٔ پلی‌آمین و توسط فعالیت آنزیم پلی‌آمین‌اکسیداز انجام می‌شود. در مسیر گابا-شانت، فعالیت GABA ترانس‌آمیناز می‌تواند تنش‌های اکسیداتیوی را با فراهم-آوری NADH و سوکسینات وارد چرخهٔ تری-کربوکسیلیک‌اسید و زنجیرهٔ انتقال الکترون میتوکندریایی جهت تولید ATP کافی، کاهش داده و تجمع پراکسید هیدروژن را تحت تنش محیطی به حداقل برساند. مسیر تخریب GABA نیز می‌تواند در تنظیم میزان آن در سلول ایفای نقش کند. تخریب، توسط آنزیم GABA ترانس آمیناز به‌صورت واکنش برگشت‌پذیر منجر به سنتز سوکسینیک سمی‌آلدئید شده که سوکسینیک اسید نیز برای حفظ چرخهٔ کربن-نیتروژن وارد چرخهٔ کربس می‌شود (Li *et al*., 2021).

در گلابی کاربرد GABA منجر به افزایش فعالیت آنزیم پراکسیداز و در نهایت باعث افزایش مقاومت این محصول به *Penicillium expansum* شده است (Yu *et al.*, 2014).

کاربرد برون‌زای GABA در گیاهچه‌های برنج باعث افزایش قابل‌توجه رشد و سالم ماندن گیاهچه‌ها در تنش گرمایی شد که این می‌تواند در ارتباط با اثر مثبت GABA در جلوگیری از صدمه دیدن غشا، بهبود شرایط سلول و میزان کلروفیل ساقه باشد (Nayyar *et al.*, 2014).

تنظیم کننده‌های رشد، به ویژه آن دسته که موجب افزایش فتوسنتز و کارکرد گیاهی می‌شوند، پتانسیل خوبی برای توسعهٔ کشاورزی دارند. یکی از اهداف کاربرد تجاری تنظیم کننده‌های رشد گیاهی طی دورهٔ زایشی، افزایش فعالیت فتوسنتزی برگ برای انتقال مواد فتوسنتزی بیشتر به میوه و دانه است. سیتوکینین در کنترل فرآیندهای متعدد و حیاتی از جمله رشد و نمو و گلدهی گیاه نقش مؤثر دارد. گزارش‌هایی مبنی بر نقش سیتوکینین‌ها در حفظ کلروفیل از طریق کاهش بیان ژن‌های تجزیه‌کنندهٔ کلروفیل مانند کلروفیلاز و پراکسیداز وجود دارد که با جلوگیری از اتلاف آب بافت، موجب حفظ سفتی میوه‌ها می‌شود (Davani *et al.*, 2016; Massolo *et al.*, 2014). فورکلرفنورون (CPPU) دارای فعالیت شبه سیتوکینین است که برای افزایش تشکیل میوه، بهبود اندازه، وزن و کیفیت میوهٔ کیوی، انگور، سیب، هلو و بادام‌زمینی به کار رفته است (Banyal *et al.*, 2020). این ترکیب همچنین سبب افزایش کیفیت محصول انگور، از طریق افزایش استحکام حبه، وزن حبه و خوشه (Zabadal and Bukovac, 2006)، و حفظ کیفیت حبه‌ها از طریق کاهش کم‌شدن وزن آن‌ها در زمان پس از برداشت شده است (Patil *et al.*, 2006). محلول‌پاشی CPPU درختان سیب رقم آنا با غلظت ۱۰ میلی‌گرم در لیتر در زمان گلدهی، تشکیل میوه و یک ماه قبل از برداشت به‌طور قابل توجهی تشکیل میوه و کیفیت میوه را افزایش داد (Taha and El Ghany, 2016). همچنین نتایج مطالعات نشان داد که محلول‌پاشی هورمون CPPU حدود دو هفته پس از تشکیل میوه باعث تولید میوه‌های درشت‌تر و با کیفیت‌تر در کیوی شد و در ضمن بقایای آن تنها شش روز پس از کاربرد در میوه باقی ماند و سپس ناپدید گردید (Ainalidou *et al.*, 2015). با توجه به نتایج به‌دست آمده از تحقیقات پژوهشگران می‌توان انتظار داشت که استفاده از سیتوکینین مصنوعی CPPU در توت‌فرنگی سبب بهبود ویژگی‌های کیفی آن گردد.

GABA، به‌عنوان مکمل غذایی در صنایع غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. GABA توسط میکروارگانیسم‌های مختلف به‌ویژه باکتری‌های لاکتیک اسید تولید می‌شود و تولید غذای فراسودمند حاوی GABA به‌دلیل دارابودن خواص زیستی و کاربردی مهم از جمله کاهش فشارخون، تسکین‌دهندگی، ضد تنش، بهبود سرعت سنتز پروتئین در مغز و غلظت هورمون‌های رشد، و جلوگیری از شرایط دیابتیک به‌طور قابل‌توجهی مورد توجه محققین قرار گرفته است. استفاده از آن هیچ عوارض جانبی بر بدن نخواهد داشت و حتی در رژیم غذایی ورزشکاران نیز گنجانده می‌شود (Nouvrozi and Esmaeili, 2013). به‌علاوه حداکثر سطح باقی‌مانده CPPU در محصولات مطابق استاندارد اروپا ۰/۰۱ میلی‌گرم در کیلوگرم می‌باشد و طبق تحقیقات انجام شده مشخص شده است که در روز ۲۵ ام پس از محلول‌پاشی CPPU با غلظت ۱۰ میلی‌گرم در لیتر، مقدار باقی‌مانده در میوهٔ توت‌فرنگی کمتر از حد مجاز بوده و نیمه عمر آن در توت‌فرنگی بین ۴/۴ تا ۷/۲ روز است. بنابراین با توجه به فاصلهٔ زمانی شروع گلدهی تا اولین برداشت محصول، کاربرد CPPU برای مصرف‌کننده عوارض جانبی نخواهد داشت (Li *et al.*, 2016a).

با در نظر گرفتن اهمیت صفات فیزیولوژیکی گیاه در تولید عملکرد کمی و کیفی توت‌فرنگی و از طرف دیگر نبود اطلاعات کافی در مورد اثر کاربرد خارجی CPPU

و GABA قبل از برداشت بر صفات فیزیولوژیک گیاه، این پژوهش با هدف بررسی برخی صفات فیزیولوژیک و کیفی میوهٔ توت‌فرنگی تحت اثر محلول‌پاشی CPPU و GABA انجام شد.

مواد و روش‌ها

برای انجام پژوهش حاضر گلخانه‌ای تونلی با پوشش پلاستیک پلی‌اتیلنی و بدون استفاده از سیستم گرمایشی در روستای دارکلاته از توابع شهرستان رامیان در استان گلستان انتخاب، و نشاهای توت‌فرنگی رقم کاماروسا با قطر طوقه یکسان (حدود یک سانتی‌متر) در گلدان‌های پلی‌اتیلنی با بستر کشت کوکوپیت و پرلیت در آبان ماه سال ۱۴۰۰ کشت شدند. محلول‌پاشی CPPU در مرحلهٔ گلدهی در سه سطح (غلظت صفر، ۵ و ۱۰ میلی‌گرم در لیتر) و محلول‌پاشی GABA در مرحلهٔ گلدهی و ۱۰ روز پس از آن در سه سطح (غلظت صفر، ۱۰ و ۲۰ میلی‌مولار) انجام شد. این پژوهش در قالب طرح بلوک کامل تصادفی در سه تکرار انجام شد. در هنگام بلوغ تجاری زمانی‌که سه چهارم سطح میوه‌های هر تیمار به قرمز تغییر رنگ داد (Gross *et al.*, 2016) ، میوه‌ها به‌طور جداگانه برداشت شده و بلافاصله به آزمایشگاه منتقل شدند. پس از به پایان رسیدن دوره برداشت میوه‌ها، بوته‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفتند.

در انتهای دورهٔ برداشت چهار بوته از هر تکرار برداشت شده و مواد اضافی به‌آرامی تحت فشار کم آب از روی ریشه‌ها شسته و حذف شدند. سپس گیاهان به دو بخش شاخساره (ساقه و برگ‌ها) و ریشه‌ها تقسیم شدند. تعداد برگ و سطح برگ با استفاده از سطح برگ‌سنج (Delta-T devices, England) در تمامی گیاهان هر تیمار اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری حجم ریشه با روش جابه‌جایی آب در استوانهٔ مدرج انجام شد. سپس در آون ۷۰ درجه سانتی‌گراد تا زمانی‌که به یک وزن ثابت مورد نظر از تودهٔ مادهٔ خشک برسد، قرار گرفت و حجم و وزن ریشه به ازای هر بوته بیان گردید (Álvarez *et al.*, 2011).

برای اندازه‌گیری میزان قند محلول کل، نمونه برگ‌های بالغ انتخاب شدند. بافت برگ جمع‌آوری شده در نیتروژن مایع ساییده شده و در دمای ۸۰- درجه سانتی‌گراد نگهداری گردید. سپس قند محلول کل از روش فنل‌سولفوریک‌اسید پس از اندازه‌گیری میزان جذب نور در طول موج ۴۹۲ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد و میزان قند کل برحسب میلی‌گرم بر گرم وزن تر محاسبه گردید (Moralesa *et al.*, 2013).

برای اندازه‌گیری محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی برگ، در این روش ابتدا ۰/۵ گرم از بافت تازه برگ را خرد کرده و در داخل لولهٔ آزمایش ریخته سپس ۱۰سی‌سی دی متیل سولفوکسیداسید خالص به آن اضافه کرده و بعد به مدت سه ساعت در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد تا رنگیزه‌ها استخراج و بافت برگی کاملاً بی‌رنگ گردد. پس از صاف کردن نمونه‌ها با کاغذ صافی واتمن، یک میلی‌لیتر از محلول صاف شده را برداشته به حجم ۵ میلی‌لیتر رسانده و میزان جذب محلول به دست آمده با استفاده از اسپکتروفتومتر، در طول موج‌های ۶۶۳، ۶۴۵، ۴۸۰ و ۵۱۰ نانومتر قرائت و میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی با استفاده از روابط ۱ تا ۴ برحسب میلی‌گرم بر گرم وزن تر نمونه محاسبه گردید (Soukht Saraei *et al.*, 2024).

رابطهٔ ۱

$$Chl\ a\ \left(\frac{mg}{g}\right) = 12.7(A663) - 2.69(A645) \times \frac{V}{1000} \times W$$

رابطهٔ ۲

$$Chl\ b\ \left(\frac{mg}{g}\right) = 22.9(A645) - 4.68(A663) \times \frac{V}{1000} \times W$$

رابطهٔ ۳

$$Chl\ total\ \left(\frac{mg}{g}\right) = 20.2(A645) + 8.02(A663) \times \frac{V}{1000} \times W$$

رابطهٔ ۴

$$Car\ \left(\frac{mg}{g}\right) = 7.6(A480) - 1.49(A510) \times \frac{V}{1000} \times W$$

برای اندازه‌گیری طول، قطر و نسبت طول به قطر میوه، ابتدا از هر تکرار پنج میوه به‌طورتصادفی برداشت شد. طول و قطر میوه با استفاده از کولیس دیجیتال تعیین و میانگین آنها ثبت گردید. میوه‌هایی که شکل آن‌ها خارج از حالت عادی و فرم میوه توت‌فرنگی بوده به‌عنوان میوه‌های بدشکل در نظر گرفته شده و درصد آن‌ها محاسبه شد.

برای سنجش سفتی بافت میوه از دستگاه سفتی‌سنج (مدل Wagner ساخت کشور ایتالیا) استفاده شد. از هر واحد آزمایشی سه میوه انتخاب شد و هرکدام از میوه‌ها دو بار و به‌صورت متقابل مورد سنجش بر اساس نیروی لازم برای نفوذ میله سفتی‌سنج قرار گرفتند. سپس سفتی بافت برحسب نیوتن بر سانتی‌مترمربع بیان گردید.

در طول دورهٔ میوه‌دهی (از ۱۵ فروردین لغایت ۱۵ اردیبهشت‌ماه) میوه‌های هر واحد آزمایشی (شامل ۱۲ گلدان و هر گلدان یک بوته)، برداشت و با ترازوی دیجیتال توزین شد. مجموع وزن میوه‌ها به‌عنوان وزن میوه برداشت شده در نظر گرفته شد.

برای سنجش رنگ میوه، ابتدا تصاویری از سطح میوه با استفاده از اسکنر (*Canon-MF*-210) استخراج گردید. سپس از تصاویر استخراج شده، مقادیر L، a و b به‌طور جداگانه توسط برنامه فتوشاپ (*CC*2015) دریافت گردید. شاخص L نشان‌دهندهٔ میزان درخشندگی (روشنایی) می‌باشد و میزان آن از صفر (سیاه) تا ۱۰۰ (سفید) متغیر است. دامنهٔ تغییرات شاخص a از ۶۰+ (قرمز) تا ۶۰- (سبز) می‌باشد. دامنهٔ تغییرات شاخص b از ۶۰- (آبی) تا ۶۰+ (زرد) می‌باشد که میزان رنگ آبی از ۶۰- و رنگ زرد از ۶۰+ به سمت مرکز دیاگرام رنگ (صفر) کاهش می‌یابد. شاخص کروما شدت و یا خلوص رنگ را مشخص می‌کند و میزان آن در مرکز دیاگرام رنگ صفر است و با فاصله از مرکز افزایش می‌یابد. شاخص کروما بر اساس رابطهٔ ۵ محاسبه شد. زاویه هیو (h°) که در فارسی به آن رنگ یا فام گفته می‌شود و در یک مختصات ۳۶۰ درجه بیان می‌شود (قرمز-صورتی $^\circ$=۰، زرد= $^\circ$ ۹۰، سبز= $^\circ$۱۸۰، آبی= $^\circ$۲۷۰) و با استفاده از رابطهٔ ۶ محاسبه شد (Pathare *et al*., 2013).

رابطهٔ ۵

$$C = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$$

رابطهٔ ۶

$$Hue\ angle = \text{Arctan}\left(\frac{b}{a}\right)$$

برای اندازه‌گیری محتوای قند کل ۰/۲ میلی‌لیتر از عصاره تغلیظ شده با ۳ میلی‌لیتر معرف آنترون مخلوط و سپس به‌مدت ۲۰ دقیقه در حمام آب گرم با دمای ۱۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد قرار گرفته و میزان جذب نور هر یک از نمونه‌ها پس از سردشدن در طول موج ۶۲۰ نانومتر اندازه‌گیری شد (McCready *et al*., 1950).

میزان سیتوکینین موجود در میوه با استفاده از روش کروماتوگرافی با کارایی بالا (HPLC) تعیین شد. برای استخراج فیتوهورمون، ۲ گرم از بافت نمونه‌ها، با متانول ۸۰ درصد سرد سابیده و همگن، سپس با ۳۰ میلی‌لیتر متانول ۸۰ درصد سرد در دمای ۴ درجهٔ سانتی‌گراد و تاریکی استخراج انجام شد. عصاره به مدت ۱۵ دقیقه با سرعت ۵۰۰۰ دور سانتریفیوژ شده و مایع رویی جمع آوری شد (Shindy, 1975., Tang *et al*., 2001). آنالیز فیتوهورمون با روش (Ma *et al*., 2008) و (Ge *et al*., 2004) و با استفاده از سیستم کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا (Unicam, Crystal 200, England) که به یک سیستم PAD متصل شده است، انجام شد. ۱۰ میکرولیتر از محلول به یک ستون فاز معکوس C_{18} با طول ۱۵۰ میلی‌متر و قطر ۲/۱ میلی‌مترتزریق و ترموستات ستون در دمای ۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد تنظیم گردید. در شرایط جداسازی تمام ترکیبات در مدت ۴۵ دقیقه با موفقیت جدا شدند.

تجزیه داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۱ و مقایسه میانگین‌ها از طریق آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال یک درصد انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس داده‌های اثر کاربرد برگی GABA و CPPU بر ویژگی‌های فیزیولوژیک و مورفولوژیک و بیوشیمیایی توت‌فرنگی رقم کاماروسا در جداول ۱، ۳، ۴ و ۵ ارائه شده است.

اثر تیمار GABA بر ویژگی‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی

حجم و وزن ریشه

بیشترین حجم ریشه (۳۷/۰۳ سانتی‌متر مکعب) در تیمار ۲۰ میلی‌مولار GABA مشاهده شد (شکل ۱) درحالی‌که تیمار شاهد و ۱۰ میلی‌مولار GABA با یکدیگر تفاوت معنی‌داری نداشتند (جدول ۲). همچنین مشخص شد که تیمارهای GABA باعث افزایش معنی‌داری در میزان وزن ریشه شدند. تیمار ۲۰ میلی‌مولار GABA با ۱۸/۵۸ گرم، بیشترین وزن ریشه را به خود اختصاص داد. چگالی ریشه با افزایش غلظت GABA به‌طور معنی‌داری کاهش یافت و بیشترین چگالی در تیمار شاهد ثبت گردید (جدول ۲).کاربرد خارجیGABA می‌تواند به‌عنوان یک عامل تنظیم‌کننده برای رشد و توسعهٔ گیاهی عمل نماید. این امر با افزایش سطح GABA درون‌زا، اسید آمینه و هورمون از طریق تنظیم مجدد ژن‌های حیاتی درگیر در هورمون‌های گیاهی به‌دست می‌آید (Hayat *et al*., 2023) و با فراهم کردن محیط مناسب برای رشد ریشه‌ها، می‌تواند به افزایش سرعت و توسعهٔ ریشه‌ها کمک کند. از طرف دیگر GABA ممکن است توانایی افزایش جذب عناصر غذایی توسط گیاهان را داشته باشد و متابولیسم نیتروژن و کربن را تنظیم نماید، و به‌عنوان یک عامل مقاومت در برابر تنش‌های محیطی عمل کند. با فراهم کردن محلول حاوی GABA، گیاهان ممکن است بهترین پاسخ را در برابر تنش‌های محیطی مانند خشکی یا نور کم داشته باشند که این می‌تواند رشد و توسعهٔ ریشه‌ها را تسهیل کند (Heli *et al*., 2022). نتایج محققین نشان می‌دهد که کاربرد GABA منجر به افزایش عملکرد رویشی در گیاه خرفه و افزایش رشد ریشه و اندام هوایی گیاهچه-های ذرت شده است (Zeinali Pour and Aghebati, 2022; Li *et al*., 2016b).

سطح و قند کل برگ

محدودهٔ سطح برگ بوته‌ها بین ۱۹۵ تا ۲۰۷ سانتی‌متر مربع بودکه البته از لحاظ آماری با یکدیگر تفاوت معنی‌دار نداشتند (جدول ۲). محدودهٔ قند برگ تیمارهای مختلف نیز بین ۰/۱۲۰ تا ۰/۱۲۲ میلی‌گرم بر گرم وزن تر متغیر بود که البته از لحاظ آماری با یکدیگر تفاوت معنی‌داری را نشان ندادند (جدول ۲).

رنگیزه‌های برگ

درحالی‌که تیمار شاهد (۱/۱۴۳ میلی‌گرم بر گرم) و ۱۰ میلی‌مولار GABA (۱/۳۲۱ میلی‌گرم بر گرم) با یکدیگر تفاوت معنی‌داری از نظر کلروفیل کل نداشتند، بیشترین کلروفیل کل در بوته‌های محلول‌پاشی شده با ۲۰ میلی‌مولار GABA (۱/۳۸۴ میلی‌گرم بر گرم) به‌دست آمد (شکل ۲). همچنین در بین تیمارها، تیمار ۲۰ میلی‌مولار GABA بیشترین میزان کلروفیل b (۰/۵۳۷ میلی‌گرم بر گرم) را به خود اختصاص داد و پس از آن تیمار ۱۰ میلی‌مولار GABA (۰/۴۸۶ میلی‌گرم بر گرم) و تیمار شاهد (۰/۴۰۹ میلی‌گرم بر گرم) قرار داشتند. به‌علاوه تیمار ۱۰ میلی‌مولار GABA بیشترین میزان کاروتنوئید (۰/۵۶۱ میلی‌گرم بر گرم) را به خود اختصاص داد و پس از آن به ترتیب تیمار ۲۰ میلی‌مولار GABA (۰/۵۲۱ میلی‌گرم بر گرم) و تیمار شاهد (۰/۴۶۵ میلی‌گرم بر گرم) قرار داشتند (شکل ۲). همان‌طور که ذکر شد GABA ممکن است بر تنظیم فعالیت‌های هورمونی گیاه تأثیر بگذارد. تنظیم هورمونی مناسب می‌تواند باعث افزایش فرایندهای فتوسنتزی شود که در نتیجه منجر به افزایش محتوای کلروفیل و کاروتنوئید در برگ‌ها می‌شود. همچنین، GABA در گیاه ذرت تحت تنش غرقابی سبب افزایش کلروفیل و در نتیجه بهبود فتوسنتز شده است که احتمالاً به‌دلیل حفظ تورژسانس سلولی است که سنتز کلروفیل را تقویت می‌کند (Salah *et al*., 2019). علاوه

بر این، GABA به‌عنوان یک مادهٔ آنتی‌اکسیدان می‌تواند در حفظ و حمایت از سلول‌ها در برابر تنش اکسیداتیو مؤثر باشد. این مسئله می‌تواند باعث حفظ کلروفیل و کاروتنوئیدها در برابر تخریب شوندگی ناشی از فعالیت‌های اکسیداتیو شود. نتایج پژوهش‌های محققین در تأثیر محلول‌پاشی GABA بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی گوجه‌فرنگی تحت تنش شوری نشان داد که بیشترین مقدار کلروفیل a، کلروفیل کل و کارتنوئید در تیمار GABA مشاهده شد (Zarei *et al.*, 2018).

اثر تیمار CPPU بر ویژگی‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی

حجم و وزن ریشه

هر دو تیمار ۵ و ۱۰ میلی‌گرم در لیتر CPPU توانستند به‌طور معنی‌داری میزان حجم ریشه را در مقایسه با تیمار شاهد افزایش دهند. همچنین مشخص شد تیمارهای ۱۰ و ۵ میلی‌گرم در لیتر CPPU به ترتیب با ۲۴/۸۶ و ۲۲/۲۶ گرم، بیشترین وزن ریشه را به خود اختصاص دادند و کمترین میزان در بوته‌های محلول‌پاشی نشده (۱۵/۶۴ گرم) مشاهده شد (شکل ۱).

چگالی ریشه در تیمار شاهد با تفاوت معنی‌داری افزایش یافت (جدول۱). استفاده از سیتوکینین‌ها می‌تواند تقسیم سلولی را تحریک و موجب ساخته‌شدن برخی پروتئین‌ها شود (Baghalzadeh Koocheh Baghi, 2015). این امر منجر به افزایش تعداد سلول‌ها و در نتیجه افزایش رشد و نمو گیاه می‌شود. همچنین، سیتوکینین‌ها می‌توانند با افزایش بیان ژن‌های مربوط به برخی فرآیندهای متابولیکی سلولی و همچنین با افزایش فعالیت آنزیم‌های دخیل در افزایش تقسیم سلولی باعث چنین اثراتی گردند. از طرف دیگر، سیتوکینین می‌تواند سنتز DNA و RNA را در سلول‌ها افزایش دهد. این امر برای تکثیر سلولی و رشد و نمو گیاه ضروری است (John and Zhang, 2001; Park *et al.*, 2021).

جدول ۱- تجزیه واریانس اثر کاربرد پیش از برداشت GABA و CPPU بر ویژگی‌های ریشه و برگ توت‌فرنگی رقم کاماروسا

Table 1. Analysis of variance for the effect of preharvest GABA and CPPU application on the root and leaf characteristics of strawberry cv. Camarosa

	S.O.V	df	Root volume	Root weight	Root density	Leaf area	Leaf total sugar
GABA							
	Block	2	5.5^{ns}	0.76^{ns}	0.0002^{ns}	10.3^{ns}	0.000113^{ns}
	GABA	2	173.16^{**}	20.64^{**}	0.0325^{**}	121.3^{ns}	0.000004^{ns}
	Error	4	6.27	0.91	0.0004	49.6	0.000309
	C.V.(%)	-	8.81	6.01	3.89	3.49	4.62
CPPU							
	Block	2	13^{ns}	8.5^{ns}	0.005^{ns}	58^{ns}	0.0009^{ns}
	CPPU	2	456^{**}	667.7^{**}	0.0215^{**}	202^{**}	0.0006^{ns}
	Error	4	2	0.8	0.0006	14	0.0007
	C.V.(%)	-	3.97	4.45	4.07	1.86	7.33

ns، * و **: به‌ترتیب به معنای عدم معنی‌داری و معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد هستند.

ns, * and **: Non significant and significant at the 5% and 1% probability levels, respectively.

جدول ۲- اثر کاربرد پیش از برداشت GABA و CPPU بر ویژگی‌های ریشه و برگ توت‌فرنگی رقم کاماروسا

Table 2. The effect of preharvest GABA and CPPU application on the root and leaf characteristics of strawberry cv. Camarosa

	Root volume (cm^3)	Root weight (g)	Root density ($g\ cm^{-3}$)	Leaf area (cm^2)	Leaf total sugar ($mg\ g^{-1}$)
GABA (mM)					
P value	0.004	0.006	<0.001	0.202	0.985
0	22.63 b	15.64 b	0.692 a	195 a	0.120 a
10	25.63 b	13.35 c	0.521 b	202 a	0.120 a
20	37.03 a	18.85 a	0.503 b	207 a	0.122 a
CPPU ($mg\ l^{-1}$)					
P value	<0.001	<0.001	0.002	0.015	1
0	22.63 c	15.64 c	0.693 a	195 b	0.120 a
5	38.70 b	22.26 b	0.521 b	205 a	0.121 a
10	46.86 a	24.86 a	0.503 b	211 a	0.120 a

برای هر ویژگی، حروف متفاوت نشان‌دهندهٔ تفاوت‌های معنی‌دار بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن است.

For each trait, different letters indicate significant differences according to Duncan's multiple range test.

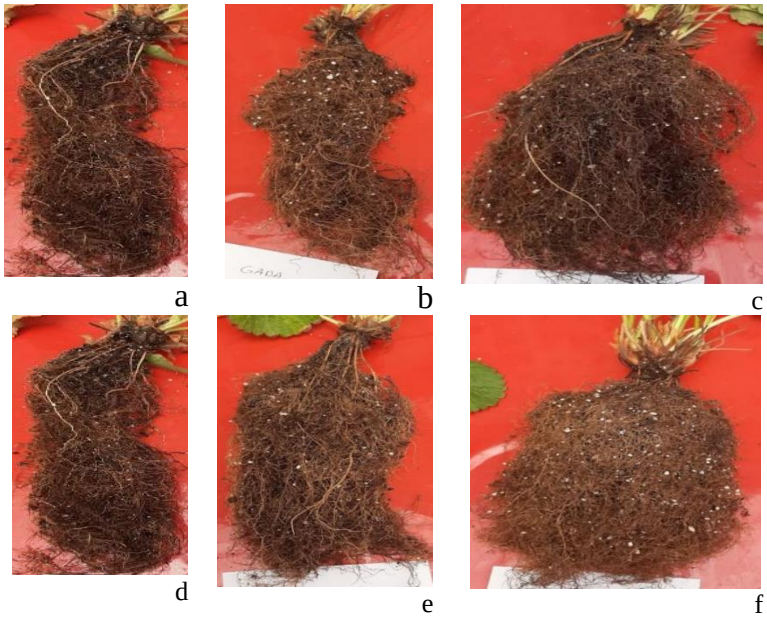
سطح برگ و قند کل برگ

بوته‌های محلول‌پاشی شده با غلظت‌های ۵ و ۱۰ میلی‌گرم در لیتر تیمار CPPU در مقایسه با بوته‌های محلول‌پاشی نشده از سطح برگ بیشتری برخوردار بودند (جدول ۲). مقدار قند کل برگ تیمارهای مختلف نیز بین ۰/۱۲۰ تا ۰/۱۲۱ میلی‌گرم بر گرم وزن تر متغیر بود (جدول ۲) که البته از لحاظ آماری با یکدیگر تفاوت معنی‌داری را نشان ندادند (جدول ۲). CPPU می‌تواند با افزایش فعالیت سیگنال‌دهی سیتوکینین، تقسیم سلولی را در برگ‌ها تحریک کند. افزایش تقسیم سلولی منجر به تولید سلول‌های برگ بیشتر و در نتیجه افزایش سطح برگ می‌شود. سیتوکینین‌ها در غلظت‌های مناسب موجب افزایش سطح برگ و تحریک رشد کلروپلاست می‌شوند همچنین با کاهش مقاومت روزنه‌ای ورود دی‌اکسید کربن به برگ را افزایش داده که موجب افزایش فعالیت کربوکسیلازی آنزیم رویسکو می‌شود و مجموع این عوامل فتوسنتز را افزایش و رشد گیاه را بهبود می‌بخشد (Fathi *et al.*, 2013). نتایج تحقیقات روی سیب‌زمینی نیز نشان داد که محلول‌پاشی CPPU به‌طور قابل توجهی بیشتر پارامترهای رشد گیاه را بهبود بخشید (El-Shraiy and Hegazi, 2010).

محتوای رنگیزه‌های برگ

بیشترین میزان کلروفیل a برگ (۰/۹۱۰ میلی‌گرم بر گرم) در تیمار ۱۰ میلی‌گرم در لیتر CPPU به‌دست آمد. درحالی‌که تیمار شاهد و ۵ میلی‌گرم در لیتر CPPU به ترتیب با میزان کلروفیل a ۰/۷۳۳ و ۰/۷۵۳ میلی‌گرم بر گرم با یکدیگر تفاوت معنی‌داری نداشتند (شکل ۳). همچنین میزان کلروفیل b برگ بین ۰/۴۱۰ تا ۰/۵۲۰ میلی‌گرم بر گرم متغیر بود (شکل ۳). همچنین تیمار شاهد (۱/۱۴۶ میلی‌گرم بر گرم) و ۵ میلی‌گرم در لیتر CPPU (۱/۱۹۶ میلی‌گرم بر گرم) با یکدیگر تفاوت معنی‌داری از نظر کلروفیل کل نداشتند و بیشترین کلروفیل کل در بوته‌های محلول‌پاشی شده با ۱۰ میلی‌گرم در لیتر CPPU (۱/۴۳۰ میلی‌گرم بر گرم) ثبت شد (شکل ۳). هر دو تیمار ۵ و ۱۰ میلی‌گرم در لیتر CPPU توانستند به‌طور معنی‌داری میزان کاروتنوئید را در مقایسه با بوته‌های محلول‌پاشی نشده افزایش دهند (شکل ۳).

نشان داده شده است که سیتوکینین‌ها نقش مؤثری در بیوسنتز کلروفیل و توسعهٔ کلروپلاست ایفا می‌کنند و می‌توانند فعالیت آنزیم‌های کلیدی درگیر در مسیر سنتز کلروفیل را افزایش دهند. همچنین، سیتوکینین‌ها می‌توانند بیان ژن‌های مسئول تولید آنزیم‌های دخیل در مسیر تجزیه کلروفیل را کاهش دهند و تخریب کلروپلاست را به تأخیر اندازند (Zubo *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2017). در راستای نتایج این پژوهش، CPPU توانست محتوای کلروفیل برگ را در درخت خرمالو افزایش دهد (Fathi *et al.*, 2011).



شکل ۱- اثر کاربرد پیش از برداشت GABA و CPPU بر حجم ریشه توت‌فرنگی رقم کاماروسا (الف: شاهد، ب: GABA ۱۰ میلی‌مولار، ج: GABA ۲۰ میلی‌مولار، د: شاهد، ه: CPPU ۵ میلی‌گرم در لیتر، و: CPPU ۱۰ میلی‌گرم در لیتر)

Figure 1. The effect of preharvest GABA and CPPU application on the root volume of strawberry cv. Camarosa (a: cotrol, b: GABA 10mM, c: GABA 20mM, d: control, e: CPPU 5 mg l^{-1}, f: CPPU 10 mg l^{-1})

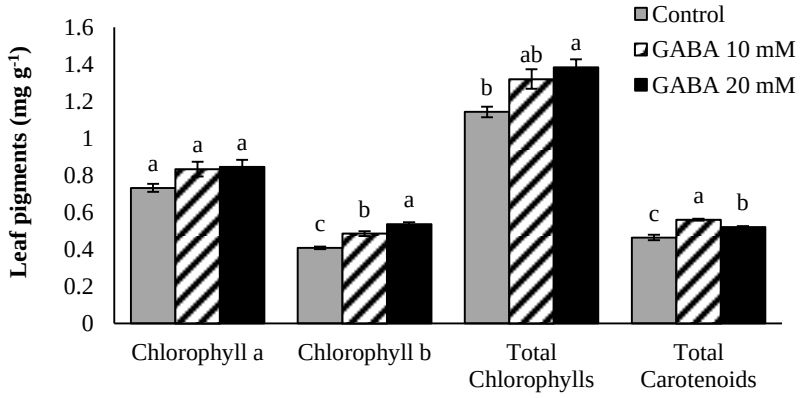
جدول ۳- تجزیه واریانس اثر کاربرد پیش از برداشت GABA بر رنگیزه‌های برگ توت‌فرنگی رقم کاماروسا

Table 3. Analysis of variance for the effect of preharvest GABA application on the leaf pigments of strawberry cv. Camarosa

S.O.V	df	Chlorophyll a content	Chlorophyll b content	Total chlorophyll content	Total carotenoid content
Block	2	0.0006^{ns}	0.00005^{ns}	0.0007^{ns}	0.0003^{ns}
GABA	2	0.0115^{ns}	0.01246^{**}	0.046825^{*}	0.007^{**}
Error	4	0.0051	0.00048	0.0078	0.0002
C.V.	-	8.89	4.63	6.91	2.93

ns، * و **: به‌ترتیب به معنای عدم معنی‌داری و معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد هستند.

ns, * and **: Non significant and significant at the 5% and 1% probability levels, respectively.



شکل ۲- اثر کاربرد پیش از برداشت GABA بر رنگیزه‌های برگ توت‌فرنگی رقم کاماروسا

Figure 2. The effect of preharvest GABA application on the leaf pigments of strawberry cv. Camarosa

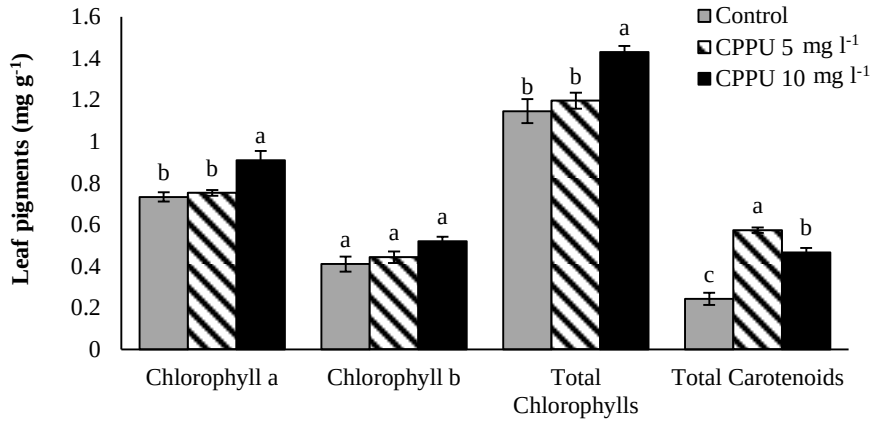
جدول ٤- تجزیه واریانس اثر کاربرد پیش از برداشت CPPU بر رنگیزه‌های برگ توت‌فرنگی رقم کاماروسا

Table 4. Analysis of variance for the effect of preharvest CPPU application on the leaf pigments of strawberry cv. Camarosa

S.O.V	df	Chlorophyll a content	Chlorophyll b content	Total chlorophyll content	Total carotenoid content
Block	2	0.0008^{ns}	0.0008^{ns}	0.0014^{ns}	0.0005^{ns}
CPPU	2	0.028^{*}	0.0095^{ns}	0.0686^{*}	0.0851^{**}
Error	4	0.0036	0.0034	0.0078	0.0019
C.V.(%)	-	7.57	12.82	7.03	10.39

ns، * و **: به‌ترتیب به معنای عدم معنی‌داری و معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد هستند.

ns, * and **: Non significant and significant at the 5% and 1% probability levels, respectively.



شکل ۳- اثر کاربرد پیش از برداشت CPPU بر رنگیزه‌های برگ توت‌فرنگی رقم کاماروسا

Figure 3. The effect of preharvest CPPU application on the leaf pigments of strawberry cv. Camarosa

اثر تیمار GABA بر ویژگی‌های مورفولوژیک و بیوشیمیایی میوهٔ توت‌فرنگی

صفات مورفولوژیکی میوه

محلول‌پاشی GABA طول، قطر و نسبت طول به قطر میوه را تحت تأثیر قرار نداد (جدول ۶). مقایسه میانگین‌ها نشان داد طول و قطر میوه به ترتیب از ۳۹/۳۷ تا ۴۵/۳۱ و از ۲۹/۴۸ تا ۳۰/۴۷ میلی‌متر در تیمارهای مختلف متغیر بود. همچنین نسبت طول به قطر میوه در محدودهٔ ۱/۲۹ تا ۱/۵۴ بود (جدول ۶). تیمارهای ۱۰ و ۲۰ میلی‌مولار GABA به‌طور معنی‌داری توانستند درصد میوه‌های بدشکل را کاهش دهند و بیشترین تعداد در تیمار شاهد (۳/۳۴ درصد) و کمترین در هر دو غلظت GABA (۲ درصد) مشاهده گردید (شکل ۴). همچنین هر دو تیمار GABA به‌طور معنی‌داری توانستند سفتی بافت میوه را در مقایسه با میوه بوته‌های محلول‌پاشی نشده افزایش دهند. بیشترین سفتی بافت میوه با محلول‌پاشی ۲۰ میلی-مولار GABA (۱/۹۶ نیوتن بر سانتی‌مترمکعب) مشاهده شد (جدول ۶). درحالی‌که تیمار شاهد (۶۸۰ گرم) و ۱۰ میلی‌مولار GABA (۷۱۷ گرم) با یکدیگر تفاوت معنی‌داری از نظر مجموع وزن میوه برداشت شده از هر واحد آزمایشی نداشتند، بیشترین مجموع وزن میوه برداشت شده در بوته‌های محلول‌پاشی شده با ۲۰ میلی‌مولار GABA (۷۹۵ گرم) ثبت شد (جدول ۶).

همان‌طور که قبلا ذکر گردید GABA می‌تواند باعث رشد گیاه و در نتیجه افزایش عملکرد محصول شود. در واقع GABA با اثر بر فعالیت‌های هورمونی گیاه می‌تواند منجر به بهبود ساختار و کیفیت بافت میوه‌ها گردد. فعالیت هورمونی مناسب به رشد و توسعهٔ سلول‌های بافت میوه کمک کرده و سبب افزایش سفتی آن‌ها می‌شود. همچنین، GABA ممکن است توانایی

تقویت دیواره‌های سلولی را افزایش دهد. با افزایش قدرت دیواره‌های سلولی، بافت میوه‌ها می‌توانند ساختار بهتری داشته و سفتی آن‌ها افزایش یابد. GABA با فعال کردن آنزیم‌هایی که در استحکام دیوارهٔ سلول نقش دارند از نرم شدن میوه جلوگیری می‌کند (Hayat *et al*., 2023; Yu *et al*., 2014). همسو با نتایج این پژوهش، غوطه‌وری توت‌فرنگی در محلول GABA باعث افزایش سفتی بافت میوه شد (Seyedhajizadeh *et al*., 2020). نتایج تحقیقات پیشین نشان داده است که محلول‌پاشی میوه لیمو و انار با GABA به‌صورت وابسته به غلظت، در افزایش اندازه و عملکرد میوه موثر بوده است (Badiche *et al*., 2023; Lorente-Mento *et al*., 2023).

محتوای قند کل میوه

محلول‌پاشی GABA منجر به افزایش میزان قند کل میوه شد. درحالی که تیمار شاهد و ۱۰ میلی‌مولار GABA تفاوت معنی‌داری با هم نداشتند، غلظت ۲۰ میلی‌مولار بیشترین قند کل (۸/۵۶ میلی‌گرم بر گرم) را به خود اختصاص داد (جدول ۶).گلوکز، فروکتوز و ساکارز قندهای غالب در توت‌فرنگی می‌باشند. یافته‌های قبلی نشان می‌دهد تیمار GABA در طول دورهٔ انبارداری میوه‌هایی مانند انگور و توت‌فرنگی سطح قند محلول بالاتری را به خود اختصاص داد (Zhang *et al*., 2024., Asgarian *et al*., 2022). افزایش قند کل را می‌توان به عملکرد GABA در بهبود شرایط رشد و تنظیم فرآیندهای متابولیکی گیاه نسبت داد.

شاخص‌های رنگ میوه

شاخص درخشندگی میوه (L) نیز تحت تأثیر تیمار GABA قرار گرفت و میوهٔ بوته‌های محلول‌پاشی شده با غلظت ۲۰ میلی‌مولار GABA از درخشندگی بالاتری برخوردار بودند (جدول ۶). به‌علاوه شاخص کروما از ۳۸/۸۵ تا ۴۵/۶۰ و زاویه هیو از ۲۵/۹۹ تا ۳۱/۱۹ در تیمارهای مختلف متفاوت بود. رنگ میوه از شاخص‌های مهم ارزیابی ظاهری در محصولات تازه‌خوری باغی می‌باشد. تنش‌های محیطی بر شرایط رنگ میوه موثر است و افزایش روشنایی رنگ در میوه‌های تیمار شده با GABA می‌تواند به‌دلیل خاصیت ضدتنشی آن باشد.

اثر تیمار CPPU بر ویژگی‌های مورفولوژیک و بیوشیمیایی میوهٔ توت‌فرنگی

صفات مورفولوژیک میوه

بیشترین طول میوه در تیمار ۱۰ میلی‌گرم در لیتر CPPU مشاهده شد، درحالی‌که تیمار شاهد و ۵ میلی‌گرم در لیتر CPPU با یکدیگر تفاوت معنی‌داری نداشتند. همچنین قطر میوه در محدودهٔ ۲۹/۹۷ تا ۳۰/۵۸ میلی‌متر متغیر بود. بیشترین نسبت طول به قطر میوه در تیمار ۱۰ میلی‌گرم در لیتر CPPU به دست آمد. CPPU به‌عنوان یک سیتوکینین، می‌تواند به تحریک رشد سلولی در بافت‌های میوه کمک کند. تحریک تقسیم سلولی در لایهٔ پریکلینال موجب تولید تعداد زیاد سلول می‌شود. همسو با نتایج این پژوهش، در انگور کاربرد CPPU در افزایش طول و قطر حبه‌ها مؤثر بود (Baghalzadeh Koocheh *et al*., 2015). Fathi *et al*. (2011) و Assad (2013) نتایج مشابهی از محلول‌پاشی CPPU با غلظت‌های ۵ و ۱۰ میلی‌گرم در لیتر بر اندازه و شکل میوه‌های آلو و خرمالو گزارش کردند. همچنین CPPU باعث افزایش طول میوه توت‌فرنگی گردید که در مطابقت با نتایج این پژوهش، در گزارش‌های قبلی نیز استفاده از CPPU سبب افزایش طول میوه کیوی گردیده است (Ainalidou *et al*., 2015).

تیمارهای ۵ و ۱۰ میلی‌گرم در لیتر CPPU به‌طور معنی‌داری توانستند درصد میوه‌های بدشکل را کاهش دهند. کمترین درصد میوه بدشکل (صفر) در تیمار ۱۰ میلی‌گرم درلیتر CPPU ثبت گردید که احتمالاً به‌دلیل تاثیر مثبت سیتوکینین در تشکیل میوه می‌باشد (شکل ۴)(Banyal and Banyal, 2020). همچنین سفتی بافت میوه در مقایسه با میوه بوته‌های محلول‌پاشی نشده افزایش یافت (جدول ۶). اثر مثبت تیمار CPPU در زمان ظهور گل آذین‌های انگور، بر سفتی بافت میوه در زمان برداشت

گزارش شده است. طبق این بررسی CPPU منجر به تغییراتی در پلی‌ساکاریدهای دیوارهٔ سلولی شد که با افزایش محتوای کلسیم و در نتیجه سفتی بیشتر میوه در هنگام برداشت مرتبط بود (Rojas *et al*., 2021). تیمار CPPU نتوانست مجموع وزن میوه برداشت شده از بوته-های توت فرنگی را تحت تأثیر قرار دهد و مجموع وزن میوه برداشت شده از هر واحد آزمایش بین ۶۷۵ تا ۷۰۲ گرم متغیر بود. احتمالاً به‌دلیل تأثیر CPPU در تأخیر رسیدن میوه‌های توت‌فرنگی، تعداد میوه‌های برداشت شده در مجموع کاهش یافته و کاربرد آن تأثیری در مجموع وزن میوه برداشت شده نداشت.

محتوای قند کل میوه

تیمار CPPU توانست میزان قند کل میوه توت‌فرنگی را تحت تأثیر قرار دهد و بیشترین قند کل در غلظت ۵ میلی‌گرم در لیتر CPPU به‌دست آمد (جدول ۶). CPPU توانست متابولیسم هورمون درون‌زای سیتوکینین را در میوه‌های توت‌فرنگی تنظیم کند که در افزایش غلظت قندها در مرحلهٔ آخر نموی دخالت داشت. به‌علاوه، CPPU به‌طور معنی‌داری سطح اسیدیته قابل تیتر را طی رسیدن میوه کاهش داد (Li *et al*., 2016a).

جدول ۵- تجزیه واریانس تغییرات برخی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی میوه توت‌فرنگی رقم کاماروسا در واکنش به کاربرد پیش از برداشت GABA و CPPU

Table 5. Analysis of variance of the changes of some physicochemical characteristics of strawberry fruit cv. Camarosa in response to preharvest GABA and CPPU application

S.O.V	df	Fruit length	Fruit diameter	Fruit length/ diameter	Fruit firmness	The total weight of harvested fruit	Malformed fruits	Cytokinin content
GABA								
Block	2	29.62^{ns}	0.61^{ns}	0.0321^{ns}	0.07^{**}	19^{ns}	0.0078^{ns}	-
GABA	2	32.05^{ns}	0.92^{ns}	0.0482^{ns}	0.703^{**}	10391^{**}	0.4444^{*}	-
Error	4	11.88	0.27	0.0129	0.003	909	0.0277	-
C.V.(%)	-	7.99	1.73	7.9	3.94	4.12	13.63	-
CPPU								
Block	2	26^{ns}	2.9^{ns}	0.056^{ns}	0.0033^{ns}	1670^{ns}	0.0009^{ns}	5.28^{ns}
CPPU	2	113^{*}	0.3^{ns}	0.114^{*}	0.0744^{**}	637^{ns}	2.0833^{**}	88.68^{**}
Error	4	22	4.9	0.024	0.0008	1986	0.0003	0.42
C.V.(%)	-	10.36	7.34	10.35	2.47	6.49	2.34	3.69

ns، * و **: به‌ترتیب به معنای عدم معنی‌داری و معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد هستند.

ns, * and **: Non significant and significant at the 5% and 1% probability levels, respectively.

جدول ۵- (ادامه)

Table 5. (Continued)

	S.O.V	df	Fruit total sugar	L Value	b Value
GABA					
	Block	2	0.111^{ns}	0.333^{ns}	7^{ns}
	GABA	2	1.007^{*}	21^{*}	25.33^{ns}
	Error	4	0.077	1.833	9.33
	C.V.(%)	-	3.525	4.89	15.02
CPPU					
	Block	2	0267^{ns}	5.777^{ns}	23.111^{ns}
	CPPU	2	0.067^{**}	52.777^{*}	66.777^{*}
	Error	4	0.056	4.777	6.777
	C.V.(%)	-	2.916	7.654	12.331

ns، * و **: به‌ترتیب عدم معنی‌داری و معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد هستند.

ns, * and **: Non significant and significant at the 5% and 1% probability levels, respectively.

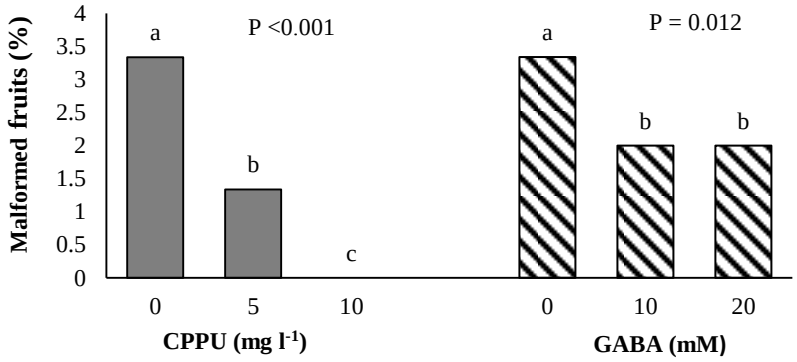
جدول ٦- تغییرات برخی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی میوه توت‌فرنگی رقم کاماروسا در واکنش به کاربرد پیش از برداشت GABA وCPPU

Table 6. The changes of some physicochemical characteristics of strawberry fruit cv. Camarosa in response to preharvest GABA and CPPU application

	Fruit length (mm)	Fruit diameter (mm)	Fruit length/ diameter	Fruit firmness (N/cm^2)	The total weight of harvested fruit (g)	Fruit total sugar (mg g^{-1})	L Value	b Value
GABA (mM)								
P value	0.181	0.138	0.121	<0.0001	0.022	0.009	0.022	0.180
0	39.37 a	30.47 a	1.29 a	1.00 c	680 b	7.46 b	24.66 b	23.67 a
10	44.70 a	30.41 a	1.47 a	1.43 b	717 b	7.70 b	28.66 a	18.33 a
20	45.31 a	29.48 a	1.54 a	1.96 a	795 a	8.56 a	29.66 a	19.00 a
CPPU (mg l^{-1})								
P value	0.078	0.939	0.088	<0.001	0.742	0.009	0.024	0.028
0	37.39 b	30.47 a	1.30 b	1.00 c	680 a	7.46 b	24.66 b	23.67 a
5	45.14 ab	29.97 a	1.51 ab	1.23 b	702 a	8.63 a	33.00 a	24.00 a
10	65.51 a	30.58 a	1.69 a	1.30 a	675 a	8.26 a	28.00 b	15.67 b

برای هر ویژگی، حروف متفاوت نشان‌دهنده تفاوت‌های معنی‌دار بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن است.

For each trait, different letters indicate significant differences according to Duncan's multiple range test.



شکل ٤- اثر کاربرد پیش از برداشت GABA و CPPU بر میوه‌های بدشکل توت‌فرنگی رقم کاماروسا

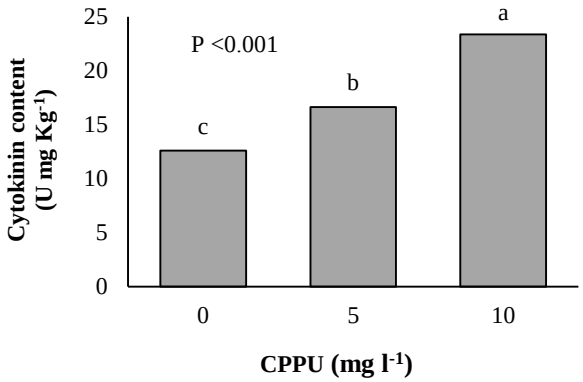
Figure 4. The effect of preharvest GABA and CPPU application on the malformed fruit of strawberry cv. Camarosa

شاخص‌های رنگ میوه

شاخص درخشندگی رنگ میوه و b نیز تحت تأثیر تیمار CPPU قرار گرفت و بیشترین درخشندگی در تیمار ۵ میلی‌گرم در لیتر و بیشترین شاخص b در تیمار شاهد ثبت شد (جدول ۶). محلول‌پاشی CPPU نتوانست شاخص a، کرومای و زاویه هیو رنگ میوه را تحت تأثیر قرار دهد و میزان شاخص کروما از ۳۷/۱۶ تا ۴۹/۲۴ و زاویه هیو از ۲۴/۷۷ تا ۳۱/۱۹ در تیمارهای مختلف متغیر بود. CPPU با تأثیر در افزایش کربوهیدرات محلول به احتمال زیاد زمینه را برای تسریع واکنش‌های مایلارد در مقابل نور آفتاب در طول دورهٔ رشد و نمو میوه فراهم می‌کند و در نهایت موجب تغییر رنگ میوه می‌شود (Baghalzadeh Koocheh Baghi *et al.*, 2015).

محتوای سیتوکینین میوه

تیمار CPPU توانست در سطح احتمال یک درصد میزان سیتوکینین میوه توت‌فرنگی را تحت تأثیر قرار دهد (شکل ۵). CPPU عملاً یک آنالوگ ساختاری سیتوکینین است. بنابراین وقتی به بافت‌ها می‌رسد عملکرد سیتوکینین را تقلید می‌کند و با اتصال به گیرنده‌های سلولی سیتوکینین آن‌ها را تحریک می‌کند (Gerald., 2005).



شکل ۵- اثر کاربرد پیش از برداشت CPPU بر محتوای سیتوکینین میوه توت‌فرنگی رقم کاماروسا

Figure 5. The effect of preharvest CPPU application on the fruit cytokinin content of strawberry cv. Camarosa

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که محلول‌پاشی بوته‌های توت‌فرنگی رقم کاماروسا توسط گاما آمینوبوتیریک اسید (GABA) توانست به‌طور معنی‌داری رشد و نمو ریشه، کلروفیل کل و کاروتنوئید برگ، سطح برگ، مجموع وزن میوهٔ برداشت شده، سفتی بافت میوه، قند کل میوه و درخشندگی رنگ آن را افزایش و درصد میوهٔ بدشکل را کاهش دهد. در این میان تیمار GABA بر طول، قطر، نسبت طول به قطر میوه و قند برگ در زمان برداشت اثر معنی‌داری نداشت. همچنین مشخص شد که محلول‌پاشی فورکلرفنورون (CPPU) توانست به‌طور معنی‌داری رشد و نمو ریشه، کلروفیل کل و کاروتنوئید برگ، سطح برگ، طول و نسبت طول به قطر میوه، سفتی بافت میوه، قند کل و درخشندگی رنگ میوه را افزایش و درصد میوه بدشکل را کاهش دهد. در این میان تیمار CPPU نتوانست قطر میوه و قند برگ در زمان برداشت را تحت تأثیر قرار دهد. در مجموع میوه‌های حاصل از بوته‌های محلول‌پاشی شده با GABA و CPPU از کیفیت بالاتری برخوردار بودند. در نهایت با توجه به نتایج به‌دست آمده، محلول‌پاشی بوته‌های توت‌فرنگی رقم کاماروسا با ۲۰ میلی‌مولار GABA و ۱۰ میلی‌گرم در لیتر CPPU به‌منظور تولید میوه با کیفیت بالا و عملکرد بیشتر، پیشنهاد می‌شود.

سپاس گزاری

نویسندگان از دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان به دلیل در اختیار قرار دادن امکانات برای انجام پژوهش حاضر قدردانی می‌نمایند.

References

Abd El-Gawad, H. G., Mukherjee, S., Farag, R., Abd Elbar, O. H., Hikal, M., El-Yazied, A. A., AbdElhady, S. A., Helal, N., ElKelish, A., Nahhas, N. E., Azab, E., Ismail, I. A., Mbarki, S., & Ibrahim, M. F. (2021). Exogenous γ-aminobutyric acid (GABA)-induced signaling events and field performance associated with mitigation of drought stress in *Phaseolus vulgaris* L. *Plant Signaling Behavior*, 16(2), 1853384. https://doi.org/10.1080/15592324.2020.1853384

Aghaee fard, F., Babalar, M., & Ahmadi, A. (2015). The effect of salicylic acid foliar spraying on qualitative characters of strawberry fruit (*Fragaria ananassa* cv. Camarosa). *Iranian Journal of Horticultural Science*, 45(4), 325-334. https://doi.org/10.22059/ijhs.2015.53482 [In Persian]

Ainalidou, A., Karamanoli, K., Menkissoglu-Spiroudi, U., Diamantidis, G., & Matsi, T. (2015). CPPU treatment and pollination: Their combined effect on kiwifruit growth and quality. *Scientia Horticulturae*, (193), 147-154. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.07.011

Álvarez, S., Navarro, A., Nicolás, E., & Sánchez-Blanco, M. J. (2011). Transpiration, photosynthetic responses, tissue water relations and dry mass partitioning in callistemon plants during drought conditions. *Scientia Horticulturae*, 129(2), 306-312. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.03.031

Anwar, R., Gull, S., Nafees, M., Amin, M., Hussain, Z., Khan, A. S., & Malik, A. U. (2018). Pre-harvest foliar application of oxalic acid improves strawberry plant growth and fruit quality. *Journal of Horticultural Science and Technology*, 1(1), 35-41. https://doi.org/10.46653/jhst180101035

Asgarian, Z. S., Karimi, R., Ghabooli, M., & Maleki, M. (2022). Biochemical changes and quality characterization of cold-stored 'sahebi' grape in response to postharvest application of GABA. *Food Chemistry*, 373, 131401. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131401

Assad, S. A. (2013). Effect of CPPU on fruit set, drop, yield and fruit quality of Hollywood and Santarosa plum cultivars. *Egyptian Journal of Horticulturae*, 40(2), 187-204. https://doi.org/10.21608/ejoh.2013.1343

Badiche, F., Valverde, J.M., Martínez-Romero, D., Castillo, S., Serrano, M., & Valero, D. (2023). Preharvest use of γ-Aminobutyric Acid (GABA) as an innovative treatment to enhance yield and quality in lemon fruit. *Horticulturae*, (9), 93. https://doi.org/10.3390/horticulturae9010093

Baghalzadeh Koocheh Baghi, A., Zaare Nahandi, F., & Naghshband Hassani, R. (2015). Effect of CPPU and GA3 on fruit quality and quantity traits of Sultanina grape. *Iranian Journal of Horticultural Science*, 46(2), 259-268. https://doi.org/10.22059/ijhs.2015.54621 [In Persian]

Banyal, A. K., & Banyal, S. K. (2020). Forchlorfenuron (CPPU): A promising plant growth regulator augments fruit size, fruit weight, quality and yield of kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) cv. Hayward. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 9(5), 2091-2101. https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.905.240

Davani, D., Nabipour, M., & Roshanfekr Dezfuli, H. (2016). Effects of different concentrations of cytokinin and auxin hormones on yield and yield components of grain maize (*Zea mays* L.) in salinity condition. *Plant Productions*, 40(1), 69-80. https://doi.org/10.22055/ppd.2016.12433 [In Persian]

El-Shraiy, M., & Hegazi, A. M. (2010). Influence of JA and CPPU on growth, yield and á- Amylase activity in potato plant (*Solanum tuberosum* L.). *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 4(2), 160-170.

Fathi, M. A., Mohamed, A. I., & Abd El-Bary, A. (2011). Effect of Sitofex (CPPU) and GA3 spray on fruit set, fruit quality, yield and monetary value of " Costata" Persimmon. *Nature and Science*, 9(8), 40-49.

Fathi, Q. A., Jalilvand, P., & Ismailpour, B. (2013). Plant growth regulating substances: principles and application. Translation, second edition. Academic Jihad Publications (Mashhad Ferdowsi University). 280 pages. [In Persian]

Ge, L., Yong, J. W., Tan, S. N., Yang, X. H., & Ong, E. S. (2004). Analysis of some cytokinins in coconut (*Cocos nucifera* L.) water by micellar electrokinetic capillary chromatography after solid-phase extraction. *Journal of Chromatography.A*, 1048(1), 119-126. https://doi.org/10.1016/j.chroma.2004.07.031

Gerald, L. 2005. Plant hormones. *Academic Press*, 568 pages.

Gross, C. K., Wang, C. Y., & Saltveit, M. (2016). The commercial storage *of* fruits, vegetables, and florist and nursery stocks. Agriculture Handbook 66, United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service, 780 p. https://doi.org/10.22004/ag.econ.348552

Hadadinejad, M., Ghasemi, K., Shadmehri, F., & Izadyar, H. (2020). Growth and yield comparison of two strawberry (*Fragaria ×ananassa* Duch) cultivars in open field under soil and soilless cultures. *Horticultural Plants Nutrition*, *2*(2), 142-157. https://doi.org/10.22070/hpn.2019.3197.1013 [In Persian]

Hayat, F., Khan, U., Li, J., Ahmed, N., Khanum, F., Iqbal, S., Altaf, M. A., Ahmad, J., Javed, H. U., Peng, Y., Ma, X., Tu, P., Chen, J., & Shahid, M. A. (2023). γ aminobutyric acid (GABA): A key player in alleviating abiotic stress resistance in horticultural crops: Current insights and future directions. *Horticulturae*, 9(6), 647. https://doi.org/10.3390/horticulturae9060647

Heli, Z., Hongyu, C., Dapeng, B., Shin, T. Y., Yejun, Z., Xi, Z., & Yingying, W. (2022). Recent advances of γ-aminobutyric acid: Physiological and immunity function, enrichment, and metabolic pathway. *Frontiers in Nutrition*, (9), 1076223. https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1076223

John, P. C. L., & Zhang, K. (2001). Cytokinin control of cell proliferation in plant development. In D Francis, ed, The plant cell cycle and its interfaces, CRC Press, Boca Raton, FL, pp 190–21.

Li, C., Zhu, J., Sun, L., Cheng, Y., Hou, J., Fan, Y., & Ge, Y. (2021). Exogenous γ-aminobutyric acid maintains fruit quality of apples through regulation of ethylene anabolism and polyamine metabolism. *Plant Physiology and Biochemistry* (169), 92–101. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.11.008

Li, L., Li, D., Luo, Z., Huang, X., & Li, X. (2016a). Proteomic response and quality maintenance in postharvest fruit of strawberry (*Fragaria* × *ananassa*) to exogenous cytokinin. *Scientific Repots*, 6, 27094. https://doi.org/10.1038/srep27094

Li, W., Lin, J., Ashraf, U., Li, G., Li, Y., Lu, W., Gao, L., Han, F., & Hu, J. (2016b). Exogenous γ-aminobutyric Acid (GABA) application improved early growth, net photosynthesis, and associated physio-biochemical events in maize. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1–13. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00919

Liu, X., Li, Y., & Zhong, S. (2017). Interplay between light and plant hormones in the control of arabidopsis seedling chlorophyll biosynthesis. *Frontiers in Plant Science*, 8, 291813. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01433

Lorente-Mento, J. M., Guillén, F., Martínez-Romero, D., Carrión-Antoli, A., Valero, D., & Serrano, M. (2023). γ-Aminobutyric acid treatments of pomegranate trees increase crop yield and fruit quality at harvest. *Scientia Horticulturae*, 309, 111633. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111633

Ma, Z., Ge, L., Lee, A. S., Yong, J. W., Tan, S. N., & Ong, E. S. (2008). Simultaneous analysis of different classes of phytohormones in coconut (*Cocos nucifera* L.) water using high-performance liquid chromatography and liquid chromatography-tandem mass spectrometry after solid-phase extraction. *Analytica Chimica Acta*, 610(2), 274-281. https://doi.org/10.1016/j.aca.2008.01.045

Massolo, J. F., Lemoine, M. L., Chaves, A. R., Concellón, A., & Vicente, A. R. (2014). Benzyl-aminopurine (BAP) treatments delay cell wall degradation and softening, improving quality maintenance of refrigerated summer squash. *Postharvest Biology and Technology*, (93), 122-129. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2014.02.010

McCready, R. M., Guggolz, J., Silviera, V., & Owens, H. S. (1950). Determination of starch and amylase in vegetables. *Analytical Chemistry*, 22, 1156-1158. https://doi.org/10.1021/ac60045a016

Miller, K., Feucht, W., & Schmid, M. (2019). Bioactive compounds of strawberry and blueberry and their potential health effects based on human intervention studies: A brief overview. *Nutrients*, 11, 1510. https://doi.org/10.3390/nu11071510

Moralesa, C. G., Pinob, M. T., & Del Pozoc, A. (2013). Phenological and physiological responses to drought stress and subsequent rehydration cycles in two raspberry cultivars. *Scientia Horticulture*, 162, 234-241. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.07.025

Nankali, A., Karami, F., & Sarseifi, M. (2014). Evaluation of new strawberry cultivars for Iran. *Acta Horticulture*, 1049, 423-430. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1049.59

Nayyar, H., Kaur, R., Kaur, S., & Singh, R. (2014). γ-Aminobutyric acid (GABA) imparts partial protection from heat stress injury to rice seedlings by improving leaf turgor and upregulating osmoprotectants and antioxidants. *Journal of Plant Growth Regulation*, 33(2), 408–419. https://doi.org/10.1007/s00344-013-9389-6

Nouvrozi, N., & Esmaeili, M. (2013). The production of Functional food containing GABA. The twenty-first National Congress of Food Science and Technology, Shiraz University, 320-327. [In Persian]

Park, J., Lee, S., Park, G., Cho, H., Choi, D., Umeda, M., Choi, Y., Hwang, D., & Hwang, I. (2021). Cytokinin-responsive growth regulator regulates cell expansion and cytokinin–mediated cell cycle progression. *Plant Physiology*, 186,1734-46. https://doi.org/10.1093/plphys/kiab180

Pathare, P. B., Opara, L. U., & Al-Said, A. F. (2013). Colour measurement and analysis in fresh and processed food: A review. *Food Bioprocess Technology*, 6(1), 36-60. https://doi.org/10.1007/s11947-012-0867-9

Patil, H. G., Ravindran, C., Jayachandran, K. S., & Jaganath, S. (2006). Influence of CPPU, TDZ and GA_3 on the postharvest quality of grape (*Vitis vinifera* L.) cultivares 'Anab-e-shahi' and 'Dilkush'. *Acta Horticulturae*, 727, 489-494. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2006.727.60

Rojas, B., Suárez-Vega, F., Saez-Aguayo, S., Olmedo, P., Zepeda, B., Delgado-Rioseco, J., Defilippi, B.G., Pedreschi, R., Meneses, C., Pérez-Donoso, A.G., & Campos-Vargas, R. (2021). Pre-anthesis cytokinin applications increase table grape berry firmness by modulating cell wall polysaccharides. *Plants*, 10(12), 2642. https://doi.org/10.3390/plants10122642

Salah, A., Zhan, M., Cao, C., Han, Y., Ling, L., Liu, Z., Li, P., Ye, M., & Jiang, Y. (2019). γ-Aminobutyric acid promotes chloroplast ultrastructure, antioxidant capacity, and growth of waterlogged maize seedlings. *Scientific Reports*, (9)484. https://doi.org/10.1038/s41598-018-36334-y

Seyedhajizadeh, H., rezaei, A., farokhzad, A., gholizadeh vakilkandi, F. (2020). Effect of Postharvest treatments of GABA and salicylic acid in antioxidant quality and marketability of Strawberry. *Plant Process and Function*; 9 (38), 113-128. http://jispp.iut.ac.ir/article-1-1326-fa.html [In Persian]

Shindy, W. W., & Smith, O. E. (1975). Identification of plant hormones from cotton ovules. *Plant Physiology*, 55(3), 550-554. https://doi.org/10.1104/pp.55.3.550

Soukht Saraei, N., Varasteh, F., & Alizadeh, M. (2024). The effect of foliar application of ascorbic acid and oxalic acid on the physiological responses of strawberry cv. Camarosa. *Journal of Horticultural Science*, 37(4), 1073-1086. https://doi.org/10.22067/jhs.2023.81120.1240 [In Persian]

Taha, N. M., & El Ghany, K. M. (2016). Some horticultural and pathological studies to reduce fruit decay of "Anna" apple and increase fruit set, yield and improve fruit quality and storability. *The Journal of American Science*, 12(1), 104-122. https://doi.org/10.7537/marsjas12011614

Tang, Y., Wang, L., Ma, C., Liu, J. & Huanxiu. (2011). The Use of HPLC in determination of endogenous hormones in anthers of bitter melon. *Journal of Life Sciences*, 5, 139-142.

Yu, C., Zeng, L., Sheng, K., Chen, F., Zhou, T., Zheng, X., & Yu, T. (2014). γ-Aminobutyric acid induces resistance against *Penicillium expansum* by priming of defense responses in pear fruit. *Food Chemistry*, 159, 29-37. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.03.011

Zabadal, T. J., & Bukovac, M. J. (2006). Effect of CPPU on fruit development of seedless and seeded grape cultivars. *HortScience*, 41, 154-157. https://doi.org/10.21273/HORTSCI.41.1.154

Zarei, L., Koushesh Saba, M., Vafaee, Y., & Javadi, T. (2018). Effect of gamma-amino-butyric acid foliar application on physiological characters of tomato (cv. Namib) under salinity stress. *Plant Productions*, 41(1), 15-28. https://doi.org/10.22055/ppd.2018.13547 [In Persian]

Zeinali Pour, N., & Aghebati, F. (2022). The Effect of Gamma amino butyric acid on improving dehydration stress tolerance in *Portulaca oleracea*. *Journal of Horticultural Science*, 36(3), 683-691. https://doi.org/10.22067/jhs.2022.73535.1106 [In Persian]

Zhang, Y., Lin, B., Tang, G., Chen, Y., Deng, M., Lin, Y., o Li, M., He, W., Wang, Y., Zhang, Y., Luo, Y., Chen, Q., Wang, X., & Tang, H. (2024). Application of γ-aminobutyric acid improves the postharvest marketability of strawberry by maintaining fruit quality and enhancing antioxidant system, *Food Chemistry*, 21,101252. https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101252

Zubo, Y. O., Yamburenko, M. V., Selivankina, S. Y., Shakirova, F. M., Avalbaev, A. M., Kudryakova, N. V., Zubkova, N. K., Liere, K., Kulaeva, O. N., Kusnetsov, V. V., & Börner, T. (2008). Cytokinin stimulates chloroplast transcription in detached barley leaves. *Plant Physiology*, 148(2), 1082-1093. https://doi.org/10.1104/pp.108.122275