Research Article

Agricultural Engineering., 49(2) (2026) 215-233

ISSN (P): 2588-526X

DOI: 10.22055/AGEN.2026.52265.1814

ISSN (E): 2588-5944

Morphophysiological Responses of Two Strawberry Cultivars, 'Sabrina' and 'Camarosa' (*Fragaria* × *ananassa*), to Copper and Zinc Amino Chelates in a Soilless Culture System

A. Danaeifar[1*], E. Khaleghi[2], A. Rahnama Ghahfarokhi[3] and A. Karami[4]

1. Assistant Professor, Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
2. Professor, Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
3. Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
4. PhD Student, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

Received: 03 June 2026 Accepted: 03 September 2026 *Corresponding Author: a.danaei@scu.ac.ir

Abstract

Introduction: Strawberry (*Fragaria* × *ananassa* Duch.) is one of the most valuable and widely cultivated berry crops in the world due to its high nutritional value, appealing flavor, and economic importance. In hydroponic systems, where nutrient solution is the sole source of mineral supply, precise management of micronutrients is essential for optimal plant growth and fruit quality. Among these micronutrients, copper (Cu) and zinc (Zn) play key roles in photosynthesis, enzyme activation, protein synthesis, and antioxidant defense. However, conventional mineral salts often show limited availability and may cause imbalances, whereas Amino-chelated (AC) forms can improve nutrient uptake and reduce toxicity. Therefore, this study aims to evaluate the combined foliar application of copper and zinc amino-chelates on the vegetative and reproductive traits of two strawberry cultivars, Sabrina and Camarosa, under hydroponic conditions.

Materials and Methods: To evaluate and compare the effects of Zn and Cu amino-chelates on the morphological characteristics of strawberry, a factorial experiment based on a completely randomized design with three replications was conducted in the greenhouse of the Faculty of Agriculture at Shahid Chamran University of Ahvaz. In January 2025, strawberry runners of ‘Camarosa’ and ‘Sabrina’ cultivars were obtained from a nursery in Kordestan province and transferred to the greenhouse. The plants were disinfected with Mancozeb fungicide and planted in growing beds (130 cm long, 25 cm wide, and 10 cm deep) containing a 70:30 mixture of coco-peat and perlite. The Rash nutrient solution was used for plant nutrition, and treatments commenced one month after plant establishment. The experimental treatments included foliar application of Cu AC at two levels (0 and 4 ml/L) and Zn AC at three levels (0, 2, and 4 ml/L) on both ‘Sabrina’ and ‘Camarosa’ cultivars. Foliar spraying was repeated monthly. Measured parameters included vegetative and reproductive characteristics, as well as photosynthetic pigments.

Results and Discussion: The study revealed that foliar application of Zn and Cu amino-chelates significantly improved vegetative growth, reproductive yield, and photosynthetic pigments in both 'Sabrina' and 'Camarosa' strawberry cultivars. Optimal responses were generally observed at 2-4 mL/L concentrations, highlighting enhanced biomass, fruit quality, and gas exchange efficiency. The highest shoot fresh weight (26 g) and dry weight (6.36 g), as well as the highest root fresh weight (16.33 g) and dry weight (3.79 g), were obtained in the Sabrina cultivar under the treatment of 2 mL L^{-1} Zn amino chelate

© 2026 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.

without the application of Cu amino chelate. The treatment consisting of 4 mL/L Cu amino-chelate combined with 2 mL/L Zn amino-chelate resulted in the highest levels of chlorophyll b (0.240 mg/gfw) and photosynthetic rate (8.57 µmol/m²/s). Zn and Cu amino-chelates improved vegetative growth, reproductive performance, and physiological traits in strawberry by enhancing nutrient uptake, chlorophyll synthesis, gas exchange, and growth-related metabolic processes. Zn likely promoted growth through its role in auxin biosynthesis, enzyme activation, and reproductive development, while Cu contributed to structural stability and root dry matter through lignin synthesis.

Conclusion: Overall, the results indicated that foliar application of Zn and Cu amino-chelates positively affected the vegetative, reproductive, and photosynthetic pigment indices in both ‘Sabrina’ and ‘Camarosa’ cultivars, with the treatments showing a greater increase in morphological traits for ‘Sabrina’ compared to ‘Camarosa

Acknowledgment: This project was supported by Shahid Chamran University of Ahvaz. The authors would like to thank the reviewers for their constructive comments and suggestions.

Keywords: Chlorophyll, Reproductive traits, Vegetative traits, Yield

مهندسی زراعی (مجله علمی کشاورزی) جلد ۴۹ شماره۲، تابستان ۱۴۰۵

مقاله پژوهشی

پاسخ‌های مورفوفیزیولوژیک دو رقم توت‌فرنگی "سابرینا" و "کاماروسا" به آمینوکلات‌های مس و روی در سیستم بدون خاک

عباس دانایی فر[1*]، اسمعیل خالقی[2]، افراسیاب راهنماقهفرخی[3] و آیدا کرمی[4]

۱- استادیار گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
۲- استاد گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
۳- استاد گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
۴- دانشجوی دکتری گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۳
پذیرش نهایی: ۱۴۰۵/۰۶/۱۲

کلمات کلیدی:
عملکرد،
کلروفیل،
ویژگی‌های رویشی، ویژگی‌های زایشی

* عهده دار مکاتبات:

Email: a.danaei@scu.ac.ir

چکیده

توت‌فرنگی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ریزمیوه‌های جهان است که به دلیل ارزش غذایی بالا و حساسیت زیاد به تغذیه معدنی، نیازمند مدیریت دقیق عناصر غذایی به‌ویژه در سیستم‌های هیدروپونیک است. در این پژوهش، اثر محلول‌پاشی آمینوکلات‌های روی (Zn AC)و آمینوکلات مس (Cu AC) بر صفات رویشی و زایشی دو رقم توت‌فرنگی "سابرینا" (*Fragaria×ananassa* 'Sabrina') و "کاماروسا" (*Fragaria×ananassa* 'Camarosa') در شرایط کشت بدون خاک بررسی گردید. آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانه دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز اجرا شد. تیمارها شامل محلول‌پاشی Cu AC (دو سطح صفر و ٤ میلی‌لیتر در لیتر) و Zn AC (سه سطح صفر، ۲ و ٤ میلی‌لیتر در لیتر) بر روی دو رقم توت‌فرنگی "سابرینا" و "کاماروسا" (جمعا در ٣٦ گلدان) بود. نتایج نشان داد که کاربرد آمینوکلات‌های روی و مس اثرات معنی‌داری بر اغلب صفات ریخت‌شناسی و عملکردی در هر دو رقم توت‌فرنگی داشت. بیشترین وزن‌تر (٢٦ گرم در بوته) و خشک (٦/٦٣ گرم در بوته) اندام هوایی و همچنین بیشترین وزن‌تر (١٦/٣٣ گرم در بوته) و خشک (٣/٧٩ گرم در بوته) ریشه در رقم "سابرینا" و تیمار ۲ میلی‌لیتر در لیتر Zn AC بدون کاربرد Cu AC به دست آمد که نسبت به تیمار مشابه در رقم "کاماروسا" افزایش ٥٨/١٥ درصدی در وزن تر اندام هوایی، ٥١/٠٢ درصدی در وزن خشک اندام هوایی و ٦٩/٢٢ درصدی در وزن تر ریشه داشت. بیشترین درصد ماده خشک اندام هوایی (٢٧/٢٣ درصد) در رقم "کاماروسا" و

تیمار ۲ میلی‌لیتر در لیتر Zn AC بدون کاربرد Cu AC به‌دست آمد. کاربرد همزمان Zn AC و Cu AC نیز موجب افزایش معنی‌دار درصد ماده خشک ریشه در هر دو رقم گردید. کاربرد آمینوکلات‌ها همچنین توانست ویژگی‌های زایشی را در هر دو رقم تحت تأثیر قرار دهند به طوری که بیشترین قطر میوه (۲/۷۳ سانتی‌متر) در رقم "سابرینا" تحت تیمار ٤ میلی‌لیتر در لیتر Zn AC بدون Cu AC به دست آمد. همچنین بیشترین تعداد میوه (۷/۳۳ عدد) و عملکرد (٦٦/۷۱ گرم در بوته) در رقم "سابرینا" و تیمار ٤ میلی‌لیتر در لیتر Cu AC مشاهده گردید که نسبت به شاهد افزایش ۲۲/۱٦ درصدی در تعداد میوه و ٤۱/۳۰ درصدی در عملکرد داشت. بیشترین میزان کلروفیلa (۰/۷۲ میلی‌گرم بر گرم) در بالاترین غلظت Zn AC و Cu AC در رقم "سابرینا" به دست آمد که نسبت به شاهد ۲۲/۰۳ درصد افزایش یافت. تیمار ٤ میلی‌لیتر در لیتر Cu AC همرا با ۲ میلی‌لیتر در لیتر Zn AC دارای بیشترین میزان کلروفیلb (۰/۲٤۰ میلی‌گرم بر گرم) و فتوسنتز (۸/۵۷ میکرومول بر متر مربع بر ثانیه) بود که نسبت به شاهد افزایش ٤۱/۱۷ درصدی در کلروفیلb و ۳۳/٤۸ درصدی در فتوسنتز داشت. به‌طور کلی، نتایج نشان داد که کاربرد Zn AC و Cu AC می‌تواند موجب بهبود رشد رویشی، زایشی و رنگیزه‌های فتوسنتزی توت‌فرنگی در سیستم هیدروپونیک شود و راهکاری مؤثر برای توسعه-ی تغذیه پایدار و کارآمد این محصول باشد.

مقدمه

توت‌فرنگی (*Fragaria × ananassa* Duch.) به‌عنوان یکی از ارزشمندترین و مهم‌ترین ریزمیوه‌های جهان به شمار می-آید که به دلیل ارزش غذایی بالا، عطر و طعم مطلوب، دوره‌ی رشدی کوتاه، بازده اقتصادی بالا از جایگاه ویژه‌ای در صنعت کشاورزی برخوردار است (Shirdel et al., 2025). تولید توت‌فرنگی با ارزش غذایی بالاتر می‌تواند تقاضا برای میوه‌های با کیفیت بالا را برآورده کند و مزایای اقتصادی کشت توت‌فرنگی را افزایش دهد (Chen et al., 2023). طبق آمار فائو در سال ۲۰۲۲ ایران با ۴۴۳۸ هکتار، پس از ترکیه بیشترین سطح زیر کشت توت فرنگی را در منطقه خاورمیانه به خود اختصاص داد (FAO, 2022). به دلیل حساسیت بالای توت‌فرنگی به کمبود مواد غذایی، نیازمند مدیریت دقیق تغذیه‌ای می-باشد (Shabani et al., 2025). با افزایش جمعیت جهانی و محدودیت منابع خاک حاصلخیز، آب و ضرورت پایداری تولید، سیستم‌های کشت هیدروپونیک به‌عنوان راهکاری نوین و کارآمد برای افزایش تولید کنترل شده این محصول و بهینه‌سازی مصرف نهاده‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند که با بهینه سازی مواد مغذی و شرایط رشد در مقایسه با کشاورزی سنتی، بازده عملکرد را افزایش می‌دهند (Keskin et al., 2025: Pomoni et al., 2023). همچنین می‌تواند استفاده از آفت کش‌ها و سایر نهاده‌ها مانند آب و کود را به حداقل برساند (Hutchinson et al., 2025). علاوه بر این سیستم هیدروپونیک تولید در طول سال را امکان پذیر کرده و جایگزین کنترل شده‌تر و انعطاف‌پذیرتری برای کشت‌های معمولی می‌باشد

(Korbee et al., 2025). در سیستم‌های هیدروپونیک، محلول غذایی تنها منبع مواد مغذی است که در اختیار گیاهان قرار می‌گیرد و غلظت عناصر غذایی یکی از عوامل عمده‌ای است که بر رشد گیاه و در نهایت بر عملکرد محصول تاثیر می‌گذارد (Ries et al., 2025). گیاه توت‌فرنگی دارای سیستم ریشه‌ای سطحی هستند، به همین دلیل به شرایط نامطلوب خاک بسیار حساس هستند بنابراین، این گیاه به مدیریت دقیق تغذیه نیاز دارد تا رشد، عملکرد میوه و کیفیت آن در سطح مطلوب حفظ شود. به‌طور کلی، کمبود عناصر غذایی ضروری می‌تواند رشد و نمو آن را مختل کند. کمبود عناصر غذایی در مراحل بحرانی رشد ممکن است منجر به رشد غیرطبیعی، توسعه ضعیف جوانه‌ها و کاهش تشکیل میوه شود. تغذیه مناسب یکی از عوامل کلیدی در رشد، عملکرد و کیفیت میوه توت‌فرنگی است. مدیریت صحیح تغذیه، به‌ویژه در سیستم‌های کشت بدون خاک اهمیت زیادی دارد. مدیریت علمی تغذیه در توت‌فرنگی برای دستیابی به تولید پایدار و باکیفیت، امری ضروری محسوب می‌شود (Samte et al., 2026). در میان عناصر غذایی عناصر کم مصرف اگر چه در مقدار کم مورد نیاز هستند اما برای رشد و نمو گیاهان مهم هستند که شامل آهن، روی، مس، بور، منگنز، مولیبدن و کلر می‌باشند (Jiménez-Rosado et al., 2022). در این سیستم‌ها، مدیریت دقیق عناصر غذایی از جمله عناصر کم مصرف نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود کمّی و کیفی محصول ایفا می‌کند (Ries et al., 2025). در میان عناصر کم مصرف ، مس (Cu) و روی (Zn) با وجود نیاز کم گیاه، نقش‌های کلیدی در فرآیندهای فیزیولوژیکی مانند فتوسنتز، تنفس، سنتز پروتئین و سیستم آنتی‌اکسیدانی دارند (Jiménez-Rosado et al., 2022). مس به عنوان یک عنصر کم مصرف ضروری نقش اساسی در رشد و نمو گیاهان دارد (Ishka et al., 2022) و یک عامل کمکی برای آنزیم‌ها (کوفاکتور) عمل می‌کند و در فتوسنتز ،تنفس، سیستم‌های آنتی-اکسیدانی و انتقال سیگنال هورمون‌ها در گیاهان نقش دارد (Wang et al., 2028) به طوری که آنزیم‌های خاصی را فعال می‌کند که در سنتز لیگنین نقش دارند (Zhou et al., 2025). روی یک عنصر کم مصرف حیاتی برای رشد و نمو گیاهان می‌باشد که نقش حیاتی در فرآیندهای فیزیولوژیکی مانند متابولیسم کربوهیدرات، بیوسنتز آنزیم‌های ضروری، سنتز پروتئین، ذخیره قند در سلول‌ها، رشد دانه گرده، فرایندهای جوانه‌زنی و تولید مثل، حفاظت در برابر تنش‌های محیطی، سنتز تریپتوفان و استفاده گیاه از نیتروژن بر عهده دارد. روی نیز در فعال‌سازی بیش از ۳۰۰ آنزیم از جمله آنزیم‌های دخیل در سنتز پروتئین، متابولیسم اکسیداتیو و تولید هورمون اکسین ضروری است (Ahmed et al., 2024). کمبود هر یک از این عناصر در توت‌فرنگی، می‌تواند منجر به اختلال در رشد رویشی، کاهش تشکیل کلروفیل، ناهنجاری‌های ریخت‌شناسی و در نهایت کاهش کمّی و کیفی عملکرد گردد (Ahmad et al., 2025). با این حال، کاربرد این عناصر به شکل نمک‌های معدنی (مانند سولفات‌ها) در سیستم هیدروپونیک دارای محدودیت‌های عمده‌ای از جمله قابلیت جذب پایین، تثبیت در محیط ریشه، برهم‌کنش‌های آنتاگونیستی با دیگر عناصر (مانند فسفر و آهن) و خطر بروز سمیت در غلظت‌های نسبتاً پایین هستند (Lakhiar et al., 2025). برای غلبه بر این موانع، استفاده از کلات‌های نسل جدید مانند آمینوکلات‌ها مورد توجه قرار گرفته است (Souri and Hatamian, 2019). کودهای شیمیایی براساس کلات‌های آمینواسیدی اولین بار توسط شیمیدان‌های آمریکایی به منظور بهبود دسترسی گیاه به عناصر غذایی توسعه یافتند (Souri, 2016 و Areche et al., 2023) و در مقایسه با کودهای معمولی و کلات‌های مصنوعی، شکل کارآمدتری از کودها هستند که به عملکرد بهتر گیاهان و کاهش خطرات زیست محیطی منجر می‌شوند (Karami et al., 2014). در ساختار آمینوکلات‌ها، یون فلزی توسط لیگاندهای آلی دارای اسیدهای آمینه محصور می‌شود و این ساختار، پایداری شیمیایی بالا در محدوده وسیع pH، قابلیت جذب و انتقال کارآمدتر در بافت گیاه، و سمیت بسیار کمتر را در مقایسه با منابع معدنی فراهم می‌کند (Souri, 2016 و Areche et al., 2023). در مقایسه با کودهای شیمیایی و کلات‌های مصنوعی، شکل کارآمدتری از کودها هستند که در حالت تغذیه برگی به عملکرد بهتر گیاهان، افزایش راندمان مصرف و کاهش خطرات زیست محیطی منجر می‌شوند

(Fahimi et al., 2016: Ghasemi et al., 2014: Ghasemi et al., 2013: Ghasemi et al., 2012). آمینوکلات‌ها علاوه بر نقشی که در جذب مواد مغذی دارند موجب افزایش مقاومت به تنش‌های غیرزیستی؛ بیوسنتز پروتئین، تولید هورمون و سنتز رنگدانه‌های فتوسنتزی کمک می‌کنند و سلامت کلی گیاه را بهبود می‌بخشند (Areche et al., 2023: Mohammadnia et al., 2025). گزارشاتی وجود دارد که کاربرد آمینوکلات‌ها موجب بهبود عملکرد و صفات کیفی در میوه خیار گردید (Fahimi et al., 2016). محلول‌پاشی آمینوکلات سبب افزایش قابل توجه عملکرد، جذب عناصر غذایی از قبیل فسفر، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی‌کل، فنول، فلاونوئید و ویتامین C در توت‌فرنگی گردید (Shabani et al., 2025). همچنین آمینوکلات‌ها در طول رشد میوه خرما، یعنی در مراحل حبابوک[1] و خلال[2] موجب بهبود عملکرد میوه، وزن میوه، طول دانه، مواد جامد محلول[3] ، pH، رطوبت میوه و رنگدانه‌ها گردید (Panahi et al., 2023). علاوه بر این، اسیدهای آمینه آزاد شده از این کلات‌ها می‌توانند به‌طور مستقیم به عنوان پیش‌سازهای متابولیکی، تنظیم‌کننده اسمزی و یا القاکننده پاسخ‌های دفاعی گیاه عمل کنند (Panahi et al., 2023: Jacob et al., 2024). در مطالعه‌ای سنتز سه آمینوکلات روی یعنی روی-آرژنین، روی-گلیسین و روی-گلوتامین و کاربرد آن‌ها بر عملکرد و عناصر مغذی تحت تنش شوری نشان داد که آمینوکلات‌های روی می‌توانند تا حدی آسیب‌های ناشی از شوری ریشه را در گیاه کاهو کاهش دهند و جذب عناصر و میزان عملکرد را افزایش دهند (Mohammadi and Khoshgoftarmanesh, 2014). همچنین عالی پور و همکاران (Alipourbabadi et al., 2026) در نتایج حاصل از مطالعات خود گزارش کردند که کاربرد آمینوکلات می‌تواند موجب حاصلخیزی خاک و افزایش عملکرد گردد. آمینوکلات‌های روی موجب افزایش جذب، انتقال، رشد گیاه و کیفیت تغذیه‌ای به ویژه در شرایط تنش می‌گردد (Elshamly et al., 2024). محلول‌پاشی آمینوکلات روی میتواند عملکرد دانه، عملکرد روغن، جذب عنصر روی، صفات فیزیولوژیکی، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و تجمع پروتئین را در گیاه بهبود بخشد (Alipourbabadi et al., 2026). با توجه به این که ارزیابی واکنش ارقام متداول و پرکاربرد توت‌فرنگی به نهاده‌های نوین تغذیه‌ای، برای ارائه توصیه‌های عملی و اختصاصی ضروری است و پژوهش‌های تحقیقاتی در مورد کاربرد آمینوکلات‌ها در این زمینه محدود هست. لذا هدف از این مطالعه کاربرد هم‌زمان محلول‌پاشی آمینوکلات‌های مس و روی بر ویژگی‌های رویشی و زایشی دو رقم توت‌فرنگی "سابرینا[4]" و "کاماروسا[5]" در شرایط کشت بدون خاک بود. انتظار می‌رود یافته‌های این مطالعه، بینش علمی ارزشمندی برای توسعه پروتکل‌های تغذیه‌ای کارآمد، پایدار و سازگار با محیط زیست در نظام‌های کشت بدون خاک توت‌فرنگی ارائه نماید.

مواد و روش‌ها

به منظور ارزیابی و مقایسه اثرات آمینوکلات روی و مس بر ویژگی‌های ریخت‌شناسی و رنگیزه‌های فتوسنتزی گیاه توت-فرنگی آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار در گلخانه دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز با میانگین دمای روز و شب به ترتیب ۳۳-۲۳ و ۲۲-۱۸ درجه سلسیوس، رطوبت نسبی ۶۰-۵۰ درصد و شدت نور ۲۰۰۰۰-۱۰۰۰۰ لوکس انجام گردید. جهت انجام این آزمایش ابتدا نشاهای توت‌فرنگی رقم‌های "سابرینا" (*Fragaria×ananassa 'Sabrina'*) و "کاماروسا" (*Fragaria×ananassa 'Camarosa'*) در یکم دی‌ماه ۱۴۰۳ از واحد تولیدی در استان کردستان تهیه و به گلخانه دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز منتقل شدند نشاها با قارچ‌کش

1- Hababouk
2- Khalal
3- Total Soluble Solid
4- Sabrina
5- Camarosa

مانکوزب ضدعفونی و در بسترهای کشت به طول ۱۳۰، عرض ۲۵ و عمق ۱۰ سانتی‌متر دارای کوکوپیت و پرلیت به نسبت ۷۰ به ۳۰ کشت شدند جهت تغذیه گیاهان از محلول غذایی رش (جدول ۱) دارای pH=۶/۲ و EC=۱/۲۵ دسی‌زیمنس بر متر استفاده شد. پس از استقرار گیاهان به شرایط جدید (یکم بهمن ۱۴۰۳) تیمارها اعمال گردید. تیمارها شامل محلول‌پاشی Cu AC در دو سطح (صفر و ۴ میلی‌لیتر در لیتر) تهیه شده از شرکت ارگانامین و Zn AC در سه سطح (صفر، ۲ و ۴ میلی‌لیتر در لیتر) تهیه شده از شرکت زیست فناوران نوین رادمهر بر دو رقم سابرینا و کاماروسا انجام گرفت. محلول‌پاشی هر ماه یکبار (در مجموع ۴ بار) تکرار گردید.

در پایان آزمایش (خرداد ۱۴۰۴) فاکتورهای زیر اندازه‌گیری گردید.

وزن‌تر و خشک اندام هوایی

در پایان آزمایش بوته‌ها از بستر کشت خارج شدند و توسط قیچی اندام هوایی از ریشه جدا و جهت اندازه‌گیری وزن‌تر و خشک به آزمایشگاه منتقل گردید. برای اندازه‌گیری وزن خشک نمونه‌ها، به مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۷۰ درجه سلسیوس قرار داده شد تا خشک شوند، سپس وزن خشک آن‌ها اندازه‌گیری گردید (Voca et al., 2007).

وزن‌تر و خشک ریشه

در پایان آزمایش به‌منظور اندازه‌گیری وزن‌تر و خشک ریشه ابتدا برای جداسازی ریشه‌ها از بستر کشت، آن‌ها را درون تشت پر از آب قرار داده تا عمل جداسازی از بستر به راحتی صورت گیرد و صدمه‌ای به ریشه گیاه وارد نشود. ریشه‌ها پس از شستشوی بستر کشت و آزادسازی در محیط آزاد قرار داده شدند تا آب سطحی آن‌ها خشک گردد. پس از توزین وزن-تر، نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در آون در دمای ۷۰ درجه سلسیوس قرار داده شدند و سپس وزن خشک‌کردن نمونه‌ها اندازه‌گیری شد.

Table(1) Mineral elements of the Resh nutrient solution

Element Concentration (ppm)	Microelement	Element Concentration (ppm)	Macroelement
0.8	Mn	139	N
0.07	Cu	63	P
0.1	Zn	209	K
0.3	B	44	Mg
0.03	Mo	169	Ca
2	Fe	96	S

درصد ماده خشک بخش هوایی و ریشه توت فرنگی

درصد ماده خشک گیاه پس از محاسبه وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه گیاه توت‌فرنگی با استفاده از رابطه ۱ محاسبه گردید.

رابطه ۱:

$\frac{M2}{M1} \times 100$ =درصد ماده خشک. در این فرمول M1= وزن تر نمونه و M2= وزن خشک نمونه می‌باشد.

طول و قطر میوه توت فرنگی

در طول آزمایش، طول و قطر میوه‌ها توسط کولیس دیجیتال با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری و بر حسب سانتی‌متر گزارش گردید.

وزن تک میوه، تعداد گل، تعداد میوه و عملکرد

وزن تک میوه توسط ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ گرم اندازه‌گیری شد. تعداد گل و میوه در طول آزمایش شمارش گردید. عملکرد کل نیز از تجمیع وزن میوه‌های برداشت شده در طول دوره رشد محاسبه و گزارش گردید.

فتوسنتز

اندازه‌گیری میزان فتوسنتز در شرایط آفتابی و نور کامل خورشید بین ساعات ۱۰-۸ صبح توسط دستگاه (Lci Console Lci model, UK) انجام گرفت. این اندازه گیری بر روی برگ گره های ۳ تا ۶ از بالای گیاه و در حالت اتصال برگ به گیاه انجام شد. هر برگ به مدت حداقل ۲۰ ثانیه درون اتاقک اندازه‌گیری قرار گرفت تا گازها توسط تهویه کوچک داخل اتاقک به خوبی مخلوط شود و به اصطلاح هوای پایدار و یکنواختی را برای فتوسنتز ایجاد کند (Danaeifar et al., 2023).

میزان کلروفیل a و b

برای اندازه‌گیری کلروفیل a و b از روش لیختنتالر (Lichtenthaler, 1987) استفاده شد. ابتدا ۱۰۰ میلی‌گرم از برگ‌های فریز شده در نیتروژن مایع وزن شدند و در هاون با ۱۰ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد همگن و به فالکون منتقل و سپس به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شدند. سپس میزان جذب نمونه‌ها در طول موج ۶۶۳/۶ و ۶۴۶/۶ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر مدل (model 7315, Jenway, UK) قرائت شد. برای محاسبه غلظت کلروفیل a و b بر حسب میکروگرم بر میلی‌گرم (میلی‌گرم بر گرم) از رابطه ۲ استفاده شد (Porra, 2002).

رابطه ۲:

[chla] = 12.25 E663.6 - 2.55 E646.6
[chl b] = 20.31 E646.6 - 4.91 E663.6

که در آن E663.6 میزان جذب در طول موج ۶۶۳/۶ نانومتر و E646.6 میزان جذب در طول موج ۶۴۶/۶ نانومتر است.

پس از پایان آزمایش داده‌ها با استفاده از نرم افزار SAS 9.1 تجزیه و تحلیل و از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد جهت مقایسه میانگین داده‌ها استفاده شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های رشدی

نتایج حاصل از جدول تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۲) نشان داد که وزن تر و خشک اندام هوایی تحت تأثیر رقم در سطح ۵ درصد و تحت تأثیر اثرات اصلی Cu AC و Zn AC، اثرات دوگانه Cu AC، Zn AC و همچنین اثرات سه گانه رقم، Cu AC و Zn AC در سطح ۱ درصد معنی‌دار گردید. وزن تر ریشه تحت تأثیر اثرات اصلی Cu AC، Zn AC و اثرات سه گانه رقم، Cu AC و Zn AC در سطح ۱ درصد معنی‌دار گردید. همه تیمارها به غیر از رقم بر وزن خشک ریشه در سطح ۱ درصد معنی‌دار گردید. درصد ماده خشک اندام هوایی تحت تأثیر اثرات اصلی Zn AC در سطح ۱ درصد و درصد ماده خشک ریشه

تحت تأثیر اثرات اصلی Zn AC در سطح ۱ درصد و تحت تأثیر اثرات دوگانه Zn AC در رقم و Zn AC در Cu AC در سطح ۵ درصد معنی‌دار گردید. براساس نتایج حاصل از پژوهش حاضر (جدول ۳) کاربرد Zn AC و Cu AC در هر دو رقم سابرینا و کاماروسا ویژگی‌های ریخت‌شناسی را تحت تأثیر قرار دادند به طوری که وزن تر و خشک اندام هوایی در اغلب موارد افزایش معنی‌داری داشت. بیشترین وزن‌تر (۲۶/۰۰ گرم در بوته) و خشک (۶/۶۳ گرم در بوته) اندام هوایی در رقم "سابرینا" در شرایط بدون کاربرد Cu AC همراه با ۲ میلی‌لیتر در لیتر Zn AC به دست آمد که نسبت به غلظت ۴ میلی‌لیتر در لیتر Zn AC افزایش ۹/۸۹ درصدی در وزن تر اندام هوایی و ۴۰/۷۶ درصدی در وزن خشک اندام هوایی داشت. در رقم "کاماروسا" Zn AC به تنهایی و همزمان با Cu AC وزن تر اندام هوایی را به طور معنی‌داری افزایش داد. درصد ماده خشک اندام هوایی تحت تأثیر تیمارها قرار گرفت در هر دو رقم کاربرد Zn AC (غلظت ۲ میلی‌لیتر در لیتر) و Cu AC به تنهایی درصد ماده خشک اندام هوایی را افزایش دادند که این افزایش در رقم "کاماروسا" همراه با ۲ میلی‌لیتر در لیتر Zn AC بدون کاربرد مس به بیشترین میزان (۲۷/۲۸ درصد) رسید که نسبت به برخی تیمارها افزایش معنی‌داری داشت و نسبت به رقم "سابرینا" در شرایط بدون کاربرد آمینوکلات افزایش ۸/۵۱ درصدی داشت. در هر دو رقم "سابرینا" و "کاماروسا" وزن تر و خشک ریشه در اثر کاربرد آمینوکلات افزایش یافت که بیشترین میزان وزن تر (۱۶/۳۳ گرم در بوته) و خشک (۳/۷۹ گرم در بوته) ریشه در رقم "سابرینا" در شرایط بدون کاربرد Cu AC همراه با ۲ میلی‌لیتر در لیتر Zn AC به دست آمد که نسبت به همه تیمارها افزایش معنی‌داری داشت. در شرایط بدون کاربرد Cu AC افزایش غلظت Zn AC از ۲ به ۴ میلی‌لیتر ویژگی‌های ریخت‌شناسی را در رقم "سابرینا" در همه موارد و در رقم "کاماروسا" در برخی موارد کاهش داد. بیشترین درصد ماده خشک ریشه در هر دو رقم "سابرینا" و "کاماروسا" در اثر کاربرد همزمان Zn AC و Cu AC به دست آمد که نسبت به اغلب تیمارها افزایش معنی‌داری داشت. درصد ماده خشک ریشه در رقم "سابرینا" افزایش ۳۸/۷۱ درصدی و در رقم "کاماروسا" افزایش ۴۱/۳۶ درصدی داشت.

Table (2) Analysis of variance for growth trait of two strawberry cultivars (Sabrina and Camarosa) in response to Cu and Zn AC

Source of variable	Degree of Free	Aerial parts fresh weight	Aerial parts dry weight	Aerial parts dry matter	Root fresh weight	Root dry weight	root dry matter
Cultivar	1	62.25*	2.78*	1.79ns	0.07ns	0.04ns	0.56ns
Cu-AC	1	170.82**	12.61**	18.51ns	86.02**	2.93**	30.18ns
Zn-Ac	2	104.94**	4.49**	143.66**	38.61**	2.08**	150.73**
Cultivar* Cu-AC	1	24.04ns	0.70ns	1.78ns	1.57ns	0.91**	18.01ns
Cultivar* Zn-Ac	2	1.81ns	0.11ns	4.70ns	9.18ns	1.01**	53.23*
Cu-AC* Zn-Ac	2	99.45**	9.11**	26.58ns	22.51ns	1.40**	89.39*
Cultivar* Cu-AC* Zn-Ac	2	104.50**	5.27**	8.35ns	50.85**	3.85**	27.92ns
Error	24	11.35	0.77	9.23	4.08	0.06	16.99
Cv		21.51	24.21	13.02	21.13	13.45	20.62

ns: non significat; *: significant at the 5% probability level; **: Significant at the 1% probability level

Table (3) Mean Comparison of the interaction effects of Cu and Zn AC on the Growth traits of two strawberry cultivars, Sabrina and Camarosa

Trait						Treatment		
root dry matter (%)	Root dry weight (g)	Root fresh weight (g)	Aerial parts dry matter (%)	Aerial parts dry weight (g)	Aerial parts fresh weight (g)	Zn AC (ml/l)	CuAC (ml/l)	Cultivar
20.64^{bcde}±1.53	1.04^{g}±0.04	5.14^{e}±0.57	25.14^{abc}±1.29	2.56^{d}±0.19	10.24^{de}±0.95	0	0	Sabrina
23.20^{abcd}±0.12	3.79^{a}±0.06	16.33^{a}±0.33	25.53^{abc}±1.33	6.63^{a}±0.46	26.00^{a}±1.52	2		
15.86^{de}±0.62	1.96^{c}±0.19	12.33^{bc}±0.88	20.11^{cde}±0.85	4.71^{b}±0.52	23.66^{ab}±3.33	4		
18.30^{bcde}±0.17	1.45^{defg}±0.08	7.95^{de}±0.41	26.65^{ab}±0.91	4.47^{bc}±0.47	16.72^{cd}±1.32	0	4	
28.63^{a}±7.12	1.41^{defg}±0.24	6.37^{de}±2.96	24.29^{abcd}±1.34	2.69^{d}±0.40	11.00^{de}±1.19	2		
14.02^{e}±0.16	1.25^{efg}±0.06	8.95^{cde}±0.55	16.87^{e}±2.48	2.34^{d}±0.23	14.21^{cde}±1.27	4		
17.96^{bcde}±1.23	1.73^{cd}±0.09	9.77^{bcd}±1.10	24.83^{abcd}±1.06	2.99^{cd}±0.56	11.97^{de}±1.90	0	0	Camarosa
16.31^{cde}±0.84	1.56^{cdef}±0.08	9.65^{bcd}±0.67	27.28^{a}±2.18	4.39^{bc}±0.46	16.44^{cde}±2.56	2		
20.43^{bcde}±0.46	2.74^{b}±0.28	13.40^{ab}±1.13	21.35^{bcde}±3.96	4.00^{bcd}±1.06	18.70^{bc}±3.27	4		
24.11^{abc}±2.06	1.68^{cde}±0.18	7.08^{de}±0.87	27.23^{a}±0.66	2.73^{d}±0.29	10.06^{e}±1.22	0	4	
25.39^{ab}±2.60	2.43^{b}±0.04	9.83^{bcd}±1.16	21.30^{bcde}±0.73	3.57^{bcd}±0.48	16.66^{cd}±1.66	2		
14.94^{e}±0.92	1.16^{fg}±0.04	7.88^{de}±0.84	19.29^{de}±1.12	2.38^{d}±0.34	12.22^{de}±1.02	4		

Means whit one same letter are not significantly different at the 5% probability level based on Duncan's multiple range test

ویژگی‌های زایشی

جدول تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۴) نشان داد که قطر میوه تحت تأثیر اثرات اصلی رقم و Cu AC در سطح ۵ درصد معنی‌دار گردید. اثرات اصلی Cu AC، اثرات دوگانه رقم در Zn AC و Cu AC در Zn AC در سطح ۵ درصد بر تعداد گل معنی‌دار گردید. تعداد میوه تحت تأثیر اثرات اصلی رقم، اثرات دوگانه رقم در Zn AC ، Zn AC در Cu AC و اثرات سه گانه در سطح ۵ درصد معنی‌دار گردید. همچنین اثرات دوگانه Zn AC در Cu AC در سطح ۵ درصد بر عملکرد معنی‌دار گردید. مطابق با نتایج به دست آمده (جدول ۵) در هر دو رقم "سابرینا" و "کاماروسا" برخی ویژگی‌های زایشی از جمله قطر میوه، تعداد گل و تعداد میوه تحت تأثیر تیمارها قرار گرفتند به طوری که اعمال تیمارها در هر دو رقم موجب افزایش قطر میوه گردید. بیشترین قطر میوه (۲/۷۳ سانتی‌متر) در رقم "سابرینا" و غلظت ۴ میلی‌لیتر در لیتر Zn AC بدون کاربرد Cu AC به دست آمد که تنها نسبت به بالاترین غلظت Cu AC و روی در رقم "کاماروسا" معنی‌دار گردید. همچنین افزایش ۸/۷۶ درصدی نسبت به شاهد داشت. بیشترین طول میوه (۳/۶۵ سانتی‌متر) در رقم "کاماروسا" همراه با ۴ میلی‌لیتر در لیتر Zn AC بدون کاربرد Cu AC به دست آمد. اعمال تیمارها به صورت جداگانه موجب افزایش تعداد گل و میوه در هر دو رقم "سابرینا" و "کاماروسا" گردید. در رقم "سابرینا" در شرایط بدون کاربرد Cu AC تعداد گل با افزایش غلظت Zn AC

شدت یافت و در بالاترین غلظت به بیشترین میزان رسید در حالی که کاربرد همزمان Zn AC و Cu AC تعداد گل را کاهش داد که تحت شرایط ۴ میلی‌لیتر بر لیتر Cu AC و ۲ میلی‌لیتر Zn AC به کمترین میزان رسید. در رقم "کاماروسا" اعمال تیمارها تعداد گل را به طور معنی‌داری افزایش داد و غلظت ۲ میلی‌لیتر بر لیتر Zn AC موجب افزایش ۳۲/۱۵ درصدی تعداد گل نسبت به شاهد گردید. در رقم "سابرینا" کاربرد آمینوکلات‌ها به تنهایی و همزمان موجب افزایش تعداد میوه گردید. بیشترین تعداد میوه (۷/۳۳) در رقم سابرینا در غلظت ۴ میلی‌لیتر بر لیتر Cu AC بدون کاربرد Zn AC به دست آمد که افزایش ۲۲/۱۶ درصدی نسبت به شاهد داشت. کاربرد Zn AC و Cu AC در هر دو رقم "کاماروسا" و "سابرینا" موجب افزایش میزان عملکرد در هر بوته گردید اما این افزایش معنی‌دار نگردید. بیشترین میزان عملکرد (۶۶/۷۱ گرم در بوته) در رقم "سابرینا" همراه با ۴ میلی‌لیتر در لیتر Cu AC به دست آمد که افزایش ۴۱/۳۰ درصدی نسبت به شاهد داشت و کمترین میزان عملکرد (۴۱/۲۱ گرم در بوته) در رقم "کاماروسا" بدون کاربرد Cu AC و Zn AC به دست آمد که کاهش ۱۲/۷۰ درصدی نسبت به تیمار مشابه در رقم "سابرینا" داشت.

میزان کلروفیل *a* تحت تأثیر اثرات اصلی Zn AC و اثرات سه گانه رقم در Cu AC و Zn AC در سطح ۵ درصد معنی-دار گردید. میزان کلروفیل *b* تحت تأثیر اثرات اصلی رقم، Cu AC ، Zn AC و اثرات دوگانه Cu AC در Zn AC در سطح ۱درصد و تحت تأثیر اثرات دوگانه رقم در Zn AC و اثرات سه گانه در سطح ۵ درصد معنی‌دار گردید. اثرات اصلی رقم و Cu AC در سطح ۱ درصد و اثرات دوگانه Cu AC در Zn AC و اثرات سه گانه در سطح ۵ درصد بر میزان فتوسنتز معنی‌دار گردید (جدول ۶). براساس نتایج به دست آمده از شکل۱ کاربرد Zn AC و Cu AC موجب افزایش معنی‌دار میزان کلروفیل*a* در هر دو رقم توت‌فرنگی گردید. در رقم "سابرینا" کاربرد همزمان ۴ میلی‌لیتر در لیتر Cu AC و Zn AC دارای بیشترین میزان کلروفیل*a* (۰/۷۲ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) بود که افزایش ۲۲/۰۳ درصدی نسبت به شاهد داشت. در رقم "کاماروسا" کاربرد Zn AC در شرایط عدم استفاده Cu AC موجب افزایش کلروفیل*a* گردید و در غلظت ۲ میلی‌لیتر در لیتر Zn AC به بیشترین میزان (۰/۶۲ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) رسید. همچنین کلروفیل*b* در هر دو رقم "کاماروسا" و "سابرینا" تحت تأثیر کاربرد همزمان Cu AC و Zn AC قرار گرفت به طوری که تیمار ۴ میلی‌لیتر در لیتر Cu AC همراه با ۲ میلی‌لیتر در لیتر Zn AC در رقم "سابرینا" دارای بیشترین میزان کلروفیل*b* (۰/۲۴۰ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر) بود که افزایش ۳۸/۷۲ درصدی در میزان کلروفیل*b* داشت (شکل ۲). محلول‌پاشی Zn AC موجب افزایش میزان تبادلات گازی در هر دو رقم توت‌فرنگی گردید به طوری که این افزایش با کاربرد Cu AC شدت یافت. در رقم "سابرینا" غلظت ۴ میلی‌لیتر در لیتر Cu AC همراه با ۲ میلی‌لیتر در لیتر Zn AC دارای بیشترین میزان فتوسنتز (۸/۵۷ میکرومول بر متر مربع بر ثانیه) بود که نسبت به شاهد افزایش ۳۳/۲۸ درصدی داشت (شکل ۳).

Table (4) Analysis of variance for reproductive traits of two strawberry cultivars (Sabrina and Camarosa) in response to Cu and Zn AC application

Source of variable	Degree of Free	Fruit diameter	Fruit Length	Single fruit weight	Flower number	Fruit number	Yield
Cultivar	1	0.44*	0.01ns	3.65ns	0.25ns	4.00*	290.24ns
Cu-AC	1	0.74*	0.001ns	1.76ns	23.36*	0.001ns	11.58ns
Zn-Ac	2	0.01ns	0.015ns	2.55ns	0.69ns	2.11ns	105.59ns
Cultivar* Cu-AC	1	0.01ns	0.002ns	2.39ns	0.25ns	1.77ns	3.20ns
Cultivar* Zn-Ac	2	0.21ns	0.07ns	8.44ns	16.08*	3.00*	92.61ns
Cu-AC* Zn-Ac	2	0.05ns	0.22ns	1.21ns	21.19*	4.00*	574.68*
Cultivar* Cu-AC* Zn-Ac	2	0.04ns	0.08ns	9.96ns	3.58ns	3.11*	34.15ns
Error	24	0.10	0.23	5.59	5.33	0.88	169.79
Cv		14.04	14.35	23.09	23.03	16.00	25.02

ns: non significat; *: significant at the 5% probability level; **: Significant at the 1% probability level

Table (5) Mean Comparison of interaction effects of Cu and Zn AC on the reproductive characteristics of two strawberry cultivars Sabrina and Camarosa

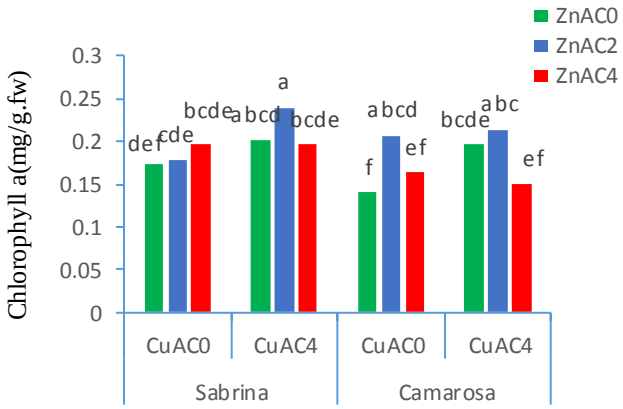
Trait						Treatment		
Yield (gr per plant)	**Fruit number**	**Flower number**	**Single fruit weight (g)**	**Fruit Length (cm)**	**Fruit diameter (cm)**	**Zn AC (ml/l)**	**Cu AC (ml/l)**	**Cultivar**
$47.21^{a}\pm2.52$	$6.00^{ab}\pm0.57$	$9.66^{ab}\pm0.33$	$12.31^{a}\pm2.62$	$3.33^{a}\pm0.35$	$2.51^{ab}\pm0.17$	0	0	Sabrina
$55.47^{a}\pm5.30$	$6.66^{a}\pm0.66$	$11.00^{a}\pm1.73$	$10.50^{a}\pm0.55$	$3.24^{a}\pm0.08$	$2.44^{ab}\pm0.16$	2		
$59.46^{a}\pm9.46$	$6.66^{a}\pm0.66$	$12.33^{a}\pm0.88$	$10.29^{a}\pm0.65$	$3.54^{a}\pm0.35$	$2.73^{a}\pm0.19$	4		
$66.71^{a}\pm9.65$	$7.33^{a}\pm0.88$	$12.00^{a}\pm0.57$	$9.70^{a}\pm0.85$	$3.41^{a}\pm0.15$	$2.23^{abc}\pm0.03$	0	4	
$41.69^{a}\pm1.58$	$4.00^{c}\pm0.001$	$6.00^{b}\pm0.57$	$10.69^{a}\pm0.36$	$3.35^{a}\pm0.34$	$2.06^{bc}\pm0.08$	2		
$58.93^{a}\pm2.11$	$6.66^{a}\pm0.33$	$9.66^{ab}\pm0.33$	$9.84^{a}\pm0.27$	$3.45^{a}\pm0.30$	$2.41^{abc}\pm0.14$	4		
$41.21^{a}\pm1.21$	$6.00^{ab}\pm0.57$	$9.33^{ab}\pm1.20$	$8.08^{a}\pm0.28$	$3.25^{a}\pm0.13$	$2.22^{abc}\pm0.03$	0	0	Camarosa
$52.95^{a}\pm9.33$	$5.66^{abc}\pm0.33$	$12.33^{a}\pm2.72$	$9.25^{a}\pm3.07$	$3.38^{a}\pm0.41$	$2.38^{abc}\pm0.30$	2		
$52.72^{a}\pm3.55$	$4.33^{bc}\pm0.33$	$10.33^{ab}\pm1.76$	$12.31^{a}\pm1.94$	$3.65^{a}\pm0.44$	$2.30^{abc}\pm0.25$	4		
$54.56^{a}\pm5.00$	$6.00^{ab}\pm0.57$	$9.66^{ab}\pm1.45$	$10.69^{a}\pm0.41$	$3.50^{a}\pm0.001$	$2.23^{abc}\pm0.24$	0	4	
$45.67^{a}\pm5.42$	$5.66^{abc}\pm0.66$	$9.66^{ab}\pm1.33$	$8.75^{a}\pm0.35$	$3.63^{a}\pm0.18$	$2.12^{abc}\pm0.25$	2		
$48.27^{a}\pm3.01$	$5.66^{abc}\pm0.33$	$8.33^{ab}\pm0.88$	$10.42^{a}\pm0.42$	$3.13^{a}\pm0.20$	$1.80^{c}\pm0.05$	4		

Means with one same letter are not significantly different at the 5% probability level based on Duncan's multiple range test

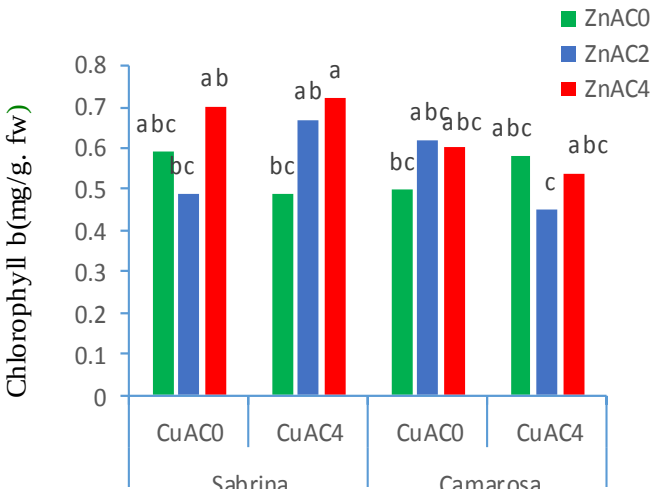
Table (6) Analysis of variance for photosynthetic pigments of two strawberry cultivars (Sabrina and Camarosa) in response to Cu and Zn AC application

Source of variable	Degree of Free	Chlorophyll a	Chlorophyll b	Photosynthesis
Cultivar	1	0.01ns	0.004**	5.31**
Cu-AC	1	0.002ns	0.007**	6.68**
Zn-Ac	2	0.05*	0.002**	0.06ns
Cultivar* Cu-AC	1	0.009ns	0.0001ns	0.07ns
Cultivar* Zn-Ac	2	0.006ns	0.001*	1.00ns
Cu-AC* Zn-Ac	2	0.001ns	0.002**	1.67*
Cultivar* Cu-AC* Zn-Ac	2	0.06*	0.001*	1.67*
Error	24	0.012	0.0003	9.48
Cv		18.61	9.71	0.47

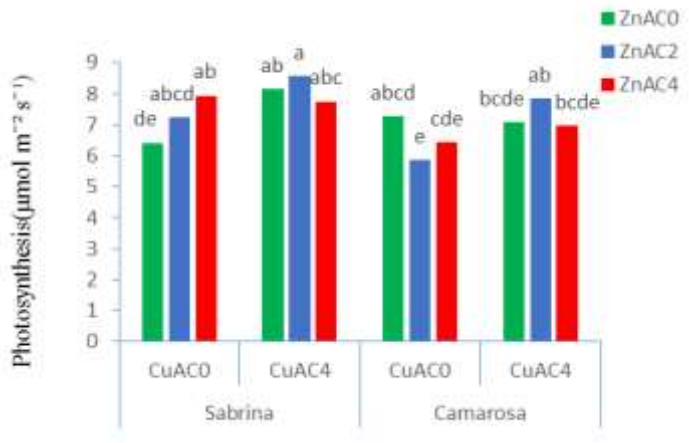
ns: non significat; *: significant at the 5% probability level; **: Significant at the 1% probability level



Figure(1) Mean Comparison of interaction effects of Cu and Zn AC on chlorophyll a of two strawberry cultivars Sabrina and Camarosa



Figure(2) Mean Comparison of interaction effects of Cu and Zn AC on chlorophyll b of two strawberry cultivars Sabrina and Camarosa



Figure(3) Mean Comparison of interaction effects of Cu and Zn AC on Photosynthesis of two strawberry cultivars Sabrina and Camarosa

بحث

مطابق با نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر کاربرد Cu and Zn AC در اغلب موارد توانستند ویژگی‌های رویشی را در هر دو رقم توت‌فرنگی سابرینا و کاماروسا افزایش دهند که بیشترین افزایش در ویژگی‌های رویشی مربوط به غلظت ۲ میلی‌لیتر در لیتر Zn AC و رقم سابرینا بود. افزایش ویژگی‌های رشدی در اثر کاربرد آمینوکلات‌ها می‌تواند به دلیل تأثیر آمینوکلات‌ها در بهبود جذب عناصر غذایی، تبادلات گازی، رنگیزه‌های فتوسنتزی و بیوسنتز هورمون‌های رشدی باشد این نتایج با نتایج حاصل از مطالعات محمدنیا و همکاران (Mohammadnia et al., 2025) مطابقت دارد که گزارش کرد اسیدهای آمینه در فرمولاسیون‌های آمینوکلات نقش مهمی در افزایش ویژگی‌های ریخت‌شناسی و عملکرد گیاه دارند. همچنین اسیدهای‌آمینه در اشکال کلات‌شده، مواد مغذی را در برابر واکنش‌های شیمیایی نامطلوب در خاک و درون بافت‌های گیاهی محافظت می‌کنند و ظرفیت جذب آنها را افزایش می‌دهند و امکان بازیابی سریع‌تر در برگ‌ها و سایر بافت‌ها را در شرایط کمبود مواد مغذی فراهم می‌کنند که از این طریق موجب بهبود ویژگی‌های رشدی گیاه از جمله افزایش تعداد برگ، سطح برگ و ارتفاع گیاه می‌گردد. همچنین ژو و همکاران (Zhou et al., 2025) در نتایج حاصل از مطالعات خود گزارش کردند که افزایش رشد رویشی گیاه در پاسخ به روی می‌تواند به دلیل نقش این عنصر کم مصرف در سنتز تریپتوفان و به دنبال آن افزایش بیوسنتز اکسین باشد. تریپتوفان موجب بهبود شاخص‌های رشدی، عملکرد و کیفیت در گیاهان می‌گردد (Areche et al., 2023). این یافته‌ها با گزارش‌های قبلی مبنی بر نقش روی به عنوان کوفاکتور بیش از ۳۰۰ آنزیم در مسیرهای بیوسنتز پروتئین، متابولیسم اکسین و حفظ یکپارچگی غشا همسو است (Ahmad et al., 2025). همچنین، فرم آمینوکلات روی به دلیل پایداری شیمیایی در محدوده وسیع pH و قابلیت انتقال از طریق آبکش، دسترسی زیستی بالاتری نسبت به منابع معدنی را دارد (Souri and Hatamian, 2019). کمبود عناصر کم مصرف به ویژه روی (Zn) منجر به مشکلات مختلفی برای گیاه از جمله کلروز و نکروز شدن بافت‌ها می‌گردد و کلات‌ها ترکیبات غنی از مواد مغذی هستند که به عنوان عناصر کم مصرف ، وضعیت بافت‌های گیاهی را بهبود می‌بخشند. همچنین آمینوکلات منجر به افزایش سطح کلروفیل، ارتفاع گیاه، شاخه‌های جانبی و در نتیجه افزایش وزن گیاه می‌گردد (Areche et al., 2023). مطالعات متعددی نشان داده‌اند که استفاده از کودهای آمینوکلات، ویژگی‌های رویشی گیاه را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهند (Fahimi et al., 2016: Souri et al., 2017). آمینوکلات‌ها به دلیل عملکرد دوگانه خود به عنوان محرک‌های زیستی و حامل‌های مواد مغذی، که سبب افزایش رشد کلی گیاه و بهبود جذب مواد مغذی می‌شود در تغذیه گیاهان اهمیت ویژه‌ای پیدا

کرده‌اند. این کلات‌های طبیعی برای افزایش تولید کلروفیل و به حداقل رساندن تخریب آن در برگ‌ها حیاتی هستند، که برای حفظ شادابی گیاه، به ویژه در شرایط چالش برانگیز، ضروری است. اسیدهای آمینه مستقیماً بر متابولیسم نیتروژن تأثیر می‌گذارند و منجر به بهبود رنگ برگ، افزایش سطح برگ و افزایش ویژگی‌های رشدی مانند ارتفاع گیاه، شاخص سطح برگ و توسعه ریشه و ساقه می‌شوند (Niharika et al., 2025). عنصر روی نقش مهمی در تقسیم سلولی و طویل شدن سلولی دارد که می‌تواند مسئول افزایش ارتفاع گیاه باشد. محلول‌پاشی روی به دلیل نقش آن در تقسیم سلولی موجب افزایش طول و ارتفاع گیاه می‌گردد (Yeboah et al., 2021). آمینوکلات‌ها به روش‌های مختلف و به طور قابل توجهی جنبه‌های متعددی از رشد رویشی، مانند ارتفاع گیاه، برگ‌ها، شاخه‌های جانبی و عمر اقتصادی گیاه را افزایش می‌دهند (Amin et al., 2011). اثرات مفید آمینوکلات بر صفات رشدی همچنین می‌تواند به دلیل میزان بالاتر جذب و انتقال آنها باشد (Yeboah et al., 2021). افزایش درصد ماده خشک ریشه در تیمار مس نیز می‌تواند ناشی از نقش مس در سنتز لیگنین و تقویت دیواره سلولی باشد (Zhou et al., 2025). همچنین بر اساس نتایج به دست آمده کاربرد Cu and Zn AC به خصوص در غلظت ۴ میلی‌لیتر بر لیتر توانستند موجب بهبود برخی ویژگی‌های زایشی از جمله قطر میوه، تعداد گل و تعداد میوه شوند در حالی که کاربرد تیمارها تأثیر معنی‌داری بر طول میوه و عملکرد در هر دو رقم توت‌فرنگی نداشتند. افزایش معنی‌دار در شاخص‌های زایشی (تعداد گل و قطر) نشان می‌دهد که آمینوکلات‌ها پتانسیل زایشی را بالا برده‌اند. اما عدم تأثیر معنی‌دار بر عملکرد می‌تواند به دلیل بازتوزیع مواد فتوسنتزی باشد؛ یعنی افزایش تعداد اندام‌های جذب‌کننده (میوه‌ها) باعث اثر رقیق‌سازی شده به طوری که کربوهیدرات‌های موجود بین میوه‌های بیشتری تقسیم شدند و مانع از افزایش وزن کل میوه‌ها گشتند. افزایش کمیت میوه‌های توت‌فرنگی در اثر کاربرد آمینوکلات می‌تواند به دلیل نقش این کمپلکس رشد در بهبود جذب عناصر غذایی، افزایش میزان فتوسنتز و سنتز بیشتر کربوهیدرات باشد که این نتایج با نتایج حاصل از مطالعات مارشنر (Marschner, 2011) مطابقت دارد که گزارش کردند آمینوکلات‌ها دارای عناصر و اسیدآمینه‌های در ترکیب خود هستند و می‌توانند آنها را به طور مؤثرتر و متعادل‌تر به بافت‌های گیاه برسانند و به دلیل جذب و کارایی بیشتر مواد مغذی و همچنین بهبود رشد رویشی می‌توانند ویژگی‌های زایشی از جمله تعداد گل و میوه را افزایش دهند. آمینوکلات‌ها بر اجزای مختلف ویژگی‌های زایشی جمله تعداد گل و میوه و قطر میوه تأثیر مثبت دارند و در نتیجه پتانسیل خود را برای بهینه‌سازی بهره‌وری کشاورزی و کیفیت محصول نشان می‌دهند. ترکیب آمینوکلات‌ها با عناصر کم مصرف موجب راندمان بالاتر، بهره‌وری و بهبود کیفیت محصول می‌گردد. این اسیدهای آمینه برای طیف وسیعی از فرآیندهای بیولوژیکی، از جمله تقسیم سلولی، رشد، فتوسنتز و سنتز تنظیم‌کننده‌های داخلی، قندها و پروتئین‌ها ضروری هستند (Niharika et al., 2025). افزایش معنی‌دار تعداد گل و میوه در رقم سابرینا با کاربرد روی، نشان‌دهنده نقش کلیدی این عنصر در فرآیندهای زایشی از جمله رشد لوله گرده و لقاح است (Jacob et al., 2024). این نتایج با نتایج حاصل از مطالعه‌ی محمدی و خوشگفتارمنش (Mohammadi and Khoshgoftarmanesh, 2014) تحت تنش شوری مطابقت دارد که در آن کاربرد آمینوکلات روی-گلیسین منجر به بهبود شاخص‌های زایشی در کاهو گردید. در مطالعه‌ی پناهی و همکاران (Panahi et al., 2025) گزارش کردند که آمینوکلات‌ها موجب بهبود ویژگی‌های زایشی، کیفیت و رنگدانه‌ها در خرما شد. بنابراین، استفاده از اسیدهای آمینه به شکل کودهای کلات، مانند آمینوکلات‌ها، می‌تواند اثرات مفید مختلفی بر جذب مواد مغذی، رشد گیاه و تولید داشته باشد. افزایش قابل توجه عملکرد به ویژه هنگامی که محلول‌پاشی برگی استفاده شد را می‌توان به افزایش تأمین مواد مغذی و نقشی که در سنتز کلروفیل، تجمع زیست توده و فعالیت فتوسنتزی بالاتر ایفا می‌کنند، نسبت داد (Yeboah et al., 2021). براساس نتایج به دست آمده کاربرد Zn AC و Cu AC توانست میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی و تبادلات گازی را در دو رقم سابرینا و کاماروسا افزایش دهد که این افزایش می‌تواند به دلیل نقش آمینوکلات‌ها در بهبود عناصر غذایی باشد

که این نتایج با نتایج حاصل از پژوهش دانایی‌فر و همکاران (Danaeifar et al., 2023) مطابقت دارد که گزارش کردند کاربرد آمینوکلات‌ها بیوسنتز کلروفیل را تحریک می‌کند و از این طریق موجب افزایش میزان تبادلات گازی از جمله فتوسنتز می‌گردد. آمینوکلات‌ها می‌توانند سنتز کلروفیل را افزایش داده و از تخریب برگ سبز جلوگیری کنند، که مهم‌ترین شاخص طراوت گیاه، به ویژه در شرایط سخت محیطی است (Fahimi et al., 2016). کاربرد آمینوکلات‌ها به دلیل خاصیت کلات کنندگی اسیدآمینه دسترسی به عناصر کم مصرف را افزایش می‌دهند و موجب افزایش میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی و تبادلات گازی می‌گردد (Zhou et al., 2025). مس نیز به عنوان یک عنصر کم مصرف ، در فتوسنتز، تنفس و سنتز لیگنین نقش دارد. با این حال، کاهش اثرگذاری در برخی تیمارها یا کاربرد همزمان آن با روی می‌تواند ناشی از اثرات آنتاگونیستی غلظت بین این دو عنصر (Fenton-like reactions) و اختلال در زنجیره انتقال الکترون باشد که موجب افزایش تولید ROS و آسیب به غشاهای سلولی شود (Jiménez-Rosado et al., 2022). بررسی تأثیر آمینوکلات‌ها بر خصوصیات ریخت-شناسی و رنگیزه‌های فتوسنتزی نشان داد که رقم سابرینا در بیشتر صفات عملکرد بهتری نسبت به رقم کاماروسا داشت. این برتری می‌تواند به دلیل توانایی ژنتیکی بالاتر سابرینا در جذب آمینوکلات‌ها، سنتز کربوهیدرات‌ها و انتقال سریعتر به بافت‌های فعال و استفاده از آن‌ها در سنتز هورمون‌ها و آنزیم‌های ضروری باشد این نتایج با نتایج حاصل از مطالعات آگوئرو و همکاران (Agüero et al., 2013) مطابقت دارد. که گزارش کرد پاسخ به ترکیبات عناصر غذایی و غلظت آن‌ها وابسته به رقم است. تفاوت‌های ژنتیکی بین گونه‌ها و ارقام مختلف گیاهی در مورد توانایی آنها در جذب یا انتقال عناصر غذایی به خوبی شناخته شده است چنین تفاوت‌هایی به ویژه در مورد جذب و انتقال عناصر نیز وجود دارد (Tohidloo et al., 2018). همچنین تومیک و همکاران (Tomic et al., 2015) گزارش کرد انتخاب رقم مناسب توت‌فرنگی می‌تواند تفاوت قابل-توجهی در ویژگی‌های رشدی داشته باشد که این تفاوت‌ها به دلیل توانایی رقم در جذب، استفاده از عناصر غذایی، مقاومت به بیماری و شرایط محیطی است. تفاوت‌های ژنتیکی بین گونه‌ها و ارقام مختلف گیاهی در مورد توانایی آنها در جذب یا انتقال عناصر غذایی به خوبی شناخته شده است چنین تفاوت‌هایی به ویژه در مورد جذب و انتقال عناصر نیز وجود دارد.

نتیجه‌گیری

به طور کلی نتایج نشان داد که محلول‌پاشی آمینوکلات‌های روی و مس در هر دو رقم سابرینا و کاماروسا تأثیر مثبتی بر بهبود شاخص‌های رویشی، زایشی و رنگیزه‌های فتوسنتزی داشتند که این تیمارها ویژگی‌های ریخت‌شناسی را در اغلب موارد در رقم سابرینا نسبت به کاماروسا به میزان بیشتری افزایش دادند به طوری که منجر به افزایش وزن تر اندام هوایی (به میزان ۱۵۳/۹ درصد در رقم سابرینا و ۵۶/۲۲ درصد در رقم کاماروسا)، وزن خشک اندام هوایی (۱۵۸/۹۸ درصد در رقم سابرینا و ۳۳/۷۷ درصد رقم کاماروسا)، وزن تر و خشک ریشه گردید، بیشترین درصد ماده خشک ریشه در هر دو رقم سابرینا و کاماروسا در اثر کاربرد همزمان آمینوکلات روی و مس به دست آمد که نسبت به اغلب تیمارها افزایش معنی‌داری داشت. همچنین، این آمینوکلات‌ها موجب افزایش کلروفیل a (۲۲/۰۳ درصد در رقم سابرینا و ۲۰ درصد رقم کاماروسا)، کلروفیل b (۳۸/۷۲ درصد در رقم سابرینا و ۴۷/۸۵ درصد رقم کاماروسا) و فتوسنتز (۳۳/۴۸ درصد سابرینا و ۷/۸۴ درصد رقم کاماروسا) گردید. این تیمارها با بهبود صفاتی نظیر قطر میوه، تعداد گل و تعداد میوه، پتانسیل عملکرد گیاه را ارتقا دادند که نشان‌دهنده اهمیت مدیریت تغذیه با عناصر کم مصرف کلاته در بهبود بهره‌وری ارقام توت‌فرنگی مورد مطالعه است.

سپاس گزاری

این پروژه با حمایت دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شده است از داوران به خاطر نظرات مفیدشان تشکر می‌کنم.

References

Agüero, J. J., & Kirschbaum, D. S. (2013). Approaches to nutrient use efficiency of different strawberry genotypes. International Journal of Fruit Science, 13(2): 139-148. https://doi.org/1080/15538362.2012.697047

Ahmed, N., Zhang, B., Chachar, Z., Li, J., Xiao, G., Wang, Q., & Tu, P. (2024). Micronutrients and their effects on horticultural crop quality, productivity and sustainability. Scientia Horticulturae, 323, 112512. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112512

Ahmad, S., Ouyang, X., Duan, S., Khan, Z., & Shen, H. (2025). Co-application of zinc and oligosaccharides enhances zinc bioavailability, yield and nutritional quality of rice. Plant Physiology and Biochemistry, *224*, 109964. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2025.109964

Alipourbabadi, M., Masir, M. N., Moezzi, A., Rahnama, A., Taghavi, M., Rashtbari, M., & Razavi, B. S. (2026). Aminochelates drive the reorganization of root-associated enzyme hotspots in the sunflower rhizosphere. Rhizosphere, (37): 1-13. https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2026.101299

Alipourbabadi, M., Masir, M. N., Moezzi, A., Rahnama, A., & Taghavi, M. (2026). Biofortifying sunflower with Zinc (Zn) aminochelates: a promising strategy for calcareous soil conditions. BMC Plant Biology. (4): 1-30. https://doi.org/10.1186/ s12870-026-08899-8

Amin, A.A., Gharib, F.A.E., El-awadi, M., & Rashad, E. (2011). Physiological response of onion plants to foliar application of putrescine and glutamine. Scientia Horticulturae, vol. 129, no. 3, pp. 353-360.http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2011.03.052

Areche, F., Aguilar, S. V., More López, J. M., Castañeda Chirre, E. T., Sumarriva-Bustinza, L. A., Pacovilca-Alejo, O. V., & Salas-Contreras, W. H. (2023). Recent and historical developments in chelated fertilizers as plant nutritional sources, their usage efficiency, and application methods. Brazilian Journal of Biology, *83*, e271055. https://doi.org/10.18006/2023.11(2).316.324

Chen, W., Xie, C., He, Q., Sun, J., & Bai, W. (2023). Improvement in color expression and antioxidant activity of strawberry juice fermented with lactic acid bacteria: A phenolic-based research. Food Chemistry*: X*, *17*, 100535. https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100535

Danaeifar A, Khaleghi E, Zivdar S, & Mehdikhanlou, K. (2023). Physiological, biochemical, and gene expression of Sour Orange (*Citrus aurantium* L.) to Iron (II)-Arginine Chelate under salinity, alkalinity, and salt–alkali combined stresses. Scientia Horticulturae, 319: 112-146. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112146

Elshamly, A. M., Iqbal, R., Ali, B., Ahmed, I., Akram, M. I., Ali, S., & Hamed, M. H. (2024). Zinc and amino acids improve the growth, physiological, and biochemical attributes of corn under different irrigation levels. Rhizosphere, 29, 100820. https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2023.100820

Fahimi, F., Souri, M.K., & Yaghobi, F. (2016). Growth and development of greenhouse cucumber under foliar application of Biomin and Humifolin fertilizers in comparison to their soil application and NPK. Iranian Journal of Science and Technology. Greenhouse Culture, 7 (25):143-152. https://doi.org/10.18869/acadpub.ejgcst.7.1.143 .

FAO. (2022). *[Title of the report in italics, e.g., The State of Food and Agriculture 2022]*. FAO.

Ghasemi, S., Khoshgoftarmanesh, A.H., & Afyuni, M. (2014). Iron (II)– amino acid chelates alleviate salt-stress induced oxidative damages on tomato grown in nutrient solution culture. Scientia Horticulture, 165:91–98. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.10.037

Ghasemi, S., Khoshgoftarmanesh, A. H., Afyuni, M., & Hadadzadeh, H. (2013). The effectiveness of foliar applications of synthesized zinc-amino acid chelates in comparison with zinc sulfate to increase yield and grain nutritional quality of wheat. European journal of agronomy, 45, 68-74. https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.10.012 .

Ghasemi, S., Khoshgoftarmanesh, A. H., Hadadzadeh, H., & Jafari, M. (2012). Synthesis of iron-amino acid chelates and evaluation of their efficacy as iron source and growth stimulator for tomato in nutrient solution culture. Journal of plant growth regulation, 31, 498-508. https://doi.org/10.1007/s00344-012-9259-7

Hutchinson, G. K., Nguyen, L. X., Ames, Z. R., Nemali, K., & Ferrarezi, R. S. (2025). Substrate system outperforms water-culture systems for hydroponic strawberry production. Frontiers in Plant Science, 16, 1469430. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1469430

Ishka, M. R., Chia, J. C., & Vatamaniuk, O. K. (2022). Advances in understanding of copper function and transport in plants. Cation transporters in plants, 205-226. https://doi.org/10.1016/b978-0-323-85790-1.00021-x

Jacob, R. H., Afify, A. S., Shanab, S. M., & Shalaby, E. A. (2024). Chelated amino acids: biomass sources, prepa-ration, properties, and biological activities. Biomass Conversion and Biorefinery, 14(3), 2907-2921. https://doi.org/10.1007/s13399-022-02333-3

Jiménez-Rosado, M., Perez-Puyana, V., Guerrero, A., & Romero, A. (2022). Micronutrient-controlled-release protein-based systems for horticulture: Micro vs. nanoparticles. Industrial Crops and Products, 185, 115128. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115128

Karami, A., Shabani, E., & Alamzadeh Ansari, N. (2014). Effect of magnesium aminochelate and seaweed (*Sargassum angustifolium*) on improving growth and quality characteristics of greenhouse cucumber in magnesium-reduced nutrient solution. Journal of Plant Production Research, 31 (1), 149-170. (Persian with English abstract)

Keskin, B., Akhoundnejad, Y., Dasgan, H. Y., & Gruda, N. S. (2025). Fulvic Acid, Amino Acids, and Vermicompost Enhanced Yield and Improved Nutrient Profile of Soilless Iceberg Lettuce. *Plants*, 14(4), 609. https://doi.org/10.3390/plants14040609

Korbee, N., Bautista, B., García-Sánchez, M., Cobos, P., Ferres-García, J. L., Figueroa, F. L., & Medrano, E. (2025). Evaluating hydroponics and aquaponics: Comparative insights into sustainability and strawberry quality. Agricultural Water Management, 312, 109412. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109412

Lakhiar, I. A., Yan, H., Syed, T. N., Zhang, C., Shaikh, S. A., Rakibuzzaman, M., & Vistro, R. B. (2025). Soilless Agricultural Systems: Opportunities, Challenges, and Applications for Enhancing Horticultural Resilience to Climate Change and Urbanization. *Horticulturae*, *11*(6), 568. https://doi.org/10.3390/horticulturae11060568

Lichtenthaler, H. K. (1987). ChloropHylls and carotenoids: pigments of pHotosynthetic biomembranes. In Methods in enzymology,148: 350-382. https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1

Marschner, P., 2011. Marschner's mineral nutrition of higher plants 3rd ed. London: Elsevier. https://doi.org/10.1017/s001447971100130x

Mohammadi, P., & Khoshgoftarmanesh, A. H. (2014). The effectiveness of synthetic zinc (Zn)-amino chelates in supplying Zn and alleviating salt-induced damages on hydroponically grown lettuce. Scientia Horticulturae, 172, 117-123. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.03.047

Mohammadnia, S., Haghighi, M., Mozafarian, M., & Geösel, A. (2025). Impact of Mycorrhiza Inoculations and Iron Amino Chelate on Growth and Physiological Changes of Cucumber Seedlings Across Different pH Levels. Plants, 14(3), 341. https://doi.org/10.3390/plants14030341

Niharika, P., Mahendran, P. P., Prabhaharan, J., Gurusamy, A., Prasanthrajan, M., Chandrakumar, K., & Yuvaraj, M. (2025). Amino acid-chelated micronutrients: A new frontier in crop nutrition and abiotic stress mitigation. https://doi.org/10.14719/pst.8302

Panahi, B., Damankeshan, B., & Asaadi, M. (2023). Evaluation of amino chelate applications that reduce symptoms of date palm bunch fading disorder. International Journal of Horticultural Science and Technology, 10(1), 69-76. https://doi.org/10.1007/s10341-025-01363-1

Pomoni, D. I., Koukou, M. K., Vrachopoulos, M. G., & Vasiliadis, L. (2023). A review of hydroponics and conven-tional agriculture based on energy and water consumption, environmental impact, and land use. Energies, 16(4), 1690. https://doi.org/10.3390/en16041690

Porra, R. J. 2002. The chequered history of the development and use of simultaneous equations for the accurate determination of chlorophylls a and b. Photosynthesis Research, 73: 149-156. https://doi.org/10.1023/a:1020470224740

Safdar, H., Amin, A., Shafiq, Y., Ali, A., Yasin, R., Shoukat, A., & Sarwar, M. I. (2019). A review: Impact of salinity on plant growth. Nature Science, 17, 34-40. https://doi.org/10.7537/marsnsj170119.06

Ries, J., Meng, Q., & Park, Y. (2025). Potassium Sulfate Supplementation with Elevated Electrical Conductivity Was Unproductive for Hydroponic Strawberry at the Original Yamazaki Nutrient Solution Nitro-gen Level. HortScience, 60(2), 198-204. https://doi.org/10.21273/hortsci18252-24

Shabani, E., Zivdar, S., Rahnama Ghahfarokhi, A., Danaeifar, A., & Davoudi Arshad, M. (2025). Foliar application of Si-aminochelate: a strategy for increasing P uptake and antioxidant properties of strawberry. BMC Plant Biology, 25(1), 1690. https://doi.org/10.1186/s12870-025-07735-9

Shirdel, M., Eshghi, S., Shahsavandi, F., & Fallahi, E. (2025). Arbuscular Mycorrhiza inoculation mitigates the adverse effects of heat stress on yield and physiological responses in strawberry plants. Plant Physiology and Biochemistry, 109629. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2025.109629

Samte, K., Khokhar, Y., Singh, N. P., & Sharma, P. (2026). Integrative effects of nutrients and hormonal regulation on quality and postharvest physiology of strawberry. Horticultural Plant Journal. 1-26. https://doi.org/10.1016/j.hpj.2025.10.013.

Souri, M. K., Sooraki, F. Y., & Moghadamyar, M. (2017). Growth and quality of cucumber, tomato, and green bean under foliar and soil applications of an aminochelate fertilizer. Horticulture, Environment, and Biotechnology, 58, 530-536. https://doi.org/10.1007/s13580-017-0349-0

Souri, M. K. (2016). Aminochelate fertilizers: the new approach to the old problem; a review. Open Agriculture, 1(1), 118-123. https://doi.org/10.1515/opag-2016-0016

Souri, M. K., & Hatamian, M. (2019). Aminochelates in plant nutrition: a review. Journal of plant nutrtion, 42(1), 67-78. https://doi.org/10.1080/01904167.2018.1549671

Souri, M. K., Sooraki, F. Y., & Moghadamyar, M. (2017). Growth and quality of cucumber, tomato, and green bean under foliar and soil applications of an aminochelate fertilizer. Horticulture, Environment, and Biotechnology, 58, 530-536. https://doi.org/10.1007/s13580-017-0349-0

Tohidloo, G., Souri, M. K., & Eskandarpour, S. (2018). Growth and Fruit Biochemical Characteristics of Three Strawberry Genotypes under Different Potassium Concentrations of Nutrient Solution. Open Agriculture, 3(1): 356-362. https://doi.org/10.1515/opag-2018-0039

Tomic, J. M., Milivojevic, J. M., & Pesakovic, M. I. (2015). The response to bacterial inoculation is cultivar-related in strawberries. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 39(2): 332-341. https://doi.org/10.3906/tar-1410-16

Voca, S., Dobricevic, N., Skendrovic Babojelic, M., Druzic, J., Duralija, B., & Levacic, J. (2007). Differences in fruit quality of strawberry cv. Elsanta depending on cultivation system and harvest time. Agriculturae Conspectus Scientificus, *72*(4): 285-288.

Wang, Y., Chen, X., & Chen, J. (2024). Advances of the Mechanism for Copper Tolerance in Plants. Plant Science, 112299. https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2024.112299

Yeboah, S., Asibuo, J., Oteng-Darko, P., Asamoah Adjei, E., Lamptey, M., Owusu Danquah, E., & Butare, L. (2021). Impact of foliar application of zinc and magnesium aminochelate on bean physiology and productivity in Ghana. International Journal of Agronomy, *2021*(1), 9766709. https://doi.org/10.1155/2021/9766709

Zhou, X., Xiong, X., Lu, F., Shi, W., Zhou, Y., Lai, N., & Huang, Z. R. (2025). Excessive copper induces lignin biosynthesis in the leaves and roots of two citrus species: Physiological, metabolomic and anatomical as-pects. Ecotoxicology and Environmental Safety, 289, 117692. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.117692