Plant Prod., 2025, 48(2), 227 - 245
https://plantproduction.scu.ac.ir/
ISSN (P): 2588-543X; **ISSN (E):** 2588-5979
Doi: 10.22055/ppd.2025.48281.2225
Received: 03 November 2024
Accepted: 01 January 2025

Plant Productions
Research Article

Combined effects of silicon aminochelate and phosphorus on photosynthetic indices and the quantitative and qualitative characteristics of strawberry (*Fragaria ananassa c*v. Paros) in greenhouse soil culture

Edris Shabani[1] *, Shohreh Zivdar[2], Afrasyab Rahnama Ghahfarokhi[3], Abbas Danaeifar[4], Mehran Davoudi Arshad[5]

1,2,4- Assistant Professor, Department of Horticultural Sciences, 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.

5- M.Sc. Graduate, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

Citation: Shabani, E., Zivdar, Sh., Rahnama Ghahfarokhi, A., Danaeifar, A., Davoudi Arshad, M. (2025). Combined effects of silicon aminochelate and phosphorus on photosynthetic indices and the quantitative and qualitative characteristics of strawberry (*Fragaria ananassa c*v. Paros) in greenhouse soil culture. *Plant Productions,* 48(2), 227- 245.

Abstract

Introduction

Most soils in Iran are calcareous, characterized by high pH levels that significantly reduce phosphorus availability to plants. In such soils, phosphorus is rapidly absorbed near the root surface, leading to a depletion zone of 0.2-1 mm around the root where phosphorus becomes scarce. A key adaptive response to phosphorus deficiency is the exudation of organic acid anions from plant roots, which enhance phosphorus solubility. Recent evidence indicates that silicon application can significantly increase the secretion of these organic acids by roots. Research has demonstrated a positive correlation between silicon availability and phosphorus mobility within plants. Moreover, exogenous silicon application can improve the activation and release of phosphorus from mineral surfaces in the soil. Given the global scarcity of phosphorus resources, its limited mobility in soil, rising costs, and concerns over excessive usage, it is essential to conduct studies on phosphorus fertilizers aimed at enhancing phosphorus uptake and improving fruit quality in greenhouse crops.

Materials and Methods

The experiment was conducted as a split-plot arrangement based on a randomized complete block design (RCBD) with three replications under greenhouse conditions. The main plot

* **Corresponding Author:** Edris Shabani
E-mail: edris.shabani@scu.ac.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

consisted of four levels of phosphorus fertilizer application (0, 7.5, 15 and 30 Kg ha^{-1}). The sub-plot included three levels of foliar-applied silicon aminochelate (0, 2 and 4 ml L^{-1}). chlorophyll a, chlorophyll b, and total chlorophyll were measured in fully expanded mature leaves using a spectrophotometer. Phosphorus content was determined by the colorimetric method. Throughout the experimental period, strawberry fruits from each treatment were harvested and counted. Individual fruit weight was measured using a digital scale with 0.01 g precision. The total fruit weight per plant was calculated as the cumulative weight of all harvested fruits during the growth cycle. The fruit dry matter percentage was calculated by dividing the dry weight by the fresh weight of the sample multiplied by 100. Fruit length and diameter were measured with calipers and expressed in centimeters. Fruit firmness was measured using a firmness tester. The pH and electrical conductivity (EC) of fruit juice were measured using a pH meter and an EC meter, respectively. Total soluble solids (TSS) content was measured using a handheld refractometer and reported as a percentage.

Results and Discussion

The results indicated that the application of 15 Kg ha^{-1} of phosphorus combined with 2 ml L^{-1} of silicon aminochelate resulted in the highest levels of chlorophyll a, chlorophyll b and total chlorophyll. The maximum whole-plant phosphorus concentration (0.98%) was also obtained under this treatment. According to the mean comparisons, the highest total fruit weight (599 g per plant) was observed with 15 Kg ha^{-1} phosphorus and 4 ml L^{-1} silicon aminochelate. This was statistically similar to the treatment with 15 Kg ha^{-1} phosphorus and 2 ml L^{-1} of silicon aminochelate. These two treatments led to a 67.62% and 68.33% increase, respectively, in total fruit weight compared to the control treatment (0 kg ha^{-1} phosphorus and 0 ml L^{-1} of silicon aminochelate). The highest fruit dry matter percentage (7.38%) was also obtained with 15 Kg ha^{-1} phosphorus and 2 ml L^{-1} silicon aminochelate treatment, which was not significantly different from the 4 ml L^{-1} silicon aminochelate treatment (6.97%) at the same phosphorus level. Numerous studies have shown that foliar application of silicon enhances chlorophyll content and fruit yield. Silicon promotes the secretion of organic acids such as malate and citrate from the roots, facilitating greater phosphorus mobilization and uptake, particularly under phosphorus-deficient conditions.

Conclusion

Based on the findings of this study, the combined application of 2 ml L^{-1} in silicon aminochelate and 15 Kg ha^{-1} of phosphorus (as monopotassium phosphate) is recommended to optimize growth, yield and fruit quality in greenhouse-grown strawberries.

Keywords: Chlorophyll content, Foliar application, Plant nutrition, Stomatal conductance

تولیدات گیاهی، ۱۴۰۴، ۴۸(۲)، ۲۲۷ – ۲۴۵
https://plantproduction.scu.ac.ir/
ISSN (P): 2588-543X; **ISSN (E):** 2588-5979
Doi: 10.22055/ppd.2025.48281.2225
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۱۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۲

تولیدات گیاهی
مقاله پژوهشی

اثرات ترکیبی آمینوکلات سیلیسیم و فسفر بر شاخص‌های فتوسنتزی و ویژگی‌های کمی و کیفی توت‌فرنگی رقم پاروس (*Fragaria ananassa* cv. Paros) در کشت خاکی گلخانه‌ای

ادریس شعبانی[۱] *، شهره زیودار[۲]، افراسیاب راهنما[۳]، عباس دانایی‌فر[۴] و مهران داودی ارشد[۵]

۱، ۲ و۴- استادیار گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
۳- استاد، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
۵- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

چکیده

یکی از مشکلات عمده در خاک‌های آهکی ایران کمبود فسفر می‌باشد. همچنین میزان غلظت فسفر محلول خاک و قابلیت دسترسی آن برای گیاه بسیار کم است. با توجه به کمبود منابع فسفر در جهان و استفاده بی‌رویه از آن، انجام مطالعات مرتبط با کودهای شیمیایی به ویژه کودهای فسفره در محصولات زراعی و گلخانه‌ای امری ضروری به نظر می‌رسد. از طرفی با کمبود سیلیسیم ورود فسفات غیرآلی به ساختمان ترکیبات حاوی فسفر مانند ATP، ADP و قندهای دارای فسفات کاهش می‌یابد. سیلیسیم سبب افزایش مقاومت به تنش‌های زیستی و غیر زیستی، بهبود عدم توازن مواد غذایی، افزایش جذب نور و فتوسنتز، افزایش شاخص‌های رشدی، عملکردی و کیفی محصولات، ارتقای بهره‌وری آب و ترسیب زیستی دی اکسیدکربن اتمسفر می‌گردد. بنابراین مطالعهٔ حاضر با هدف بررسی اثر محلول پاشی آمینوکلات سیلیسیم بر جذب فسفر و ویژگی‌های کمی و کیفی میوه توت فرنگی در کشت گلخانه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا آزمایشی به صورت طرح کرت‌های خرد شده و در قالب طرح پایهٔ بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در شهرستان ایذه استان خوزستان در سال ۱۴۰۲-۱۴۰۱ اجرا گردید. در این آزمایش چهار سطح مختلف کود فسفر از منبع منوپتاسیم فسفات (۰، ۷/۵، ۱۵ و ۳۰ کیلوگرم در هکتار) در کرت های اصلی و سه سطح محلول‌پاشی سیلیسیم از منبع آمینوکلات سیلیسیم (۰، ۲ و ۴ میلی‌لیتر بر لیتر) در کرت های فرعی قرار گرفت. رقم توت‌فرنگی مورد استفاده در این آزمایش از نوع پاروس بود. بوته‌ها در طول فصل رشد به‌صورت هر ۱۰ روز یک بار با غلظت‌های مختلف منوپتاسیم فسفات به صورت کود آبیاری تغذیه شدند. همچنین محلول‌پاشی آمینوکلات سیلیسیم به صورت هر دو هفته یکبار به صورت کاربرد برگی بر بوته‌های مورد نظر در هر کرت آزمایشی اعمال گردید. نتایج این آزمایش نشان داد که کاربرد ۱۵ کیلوگرم در هکتار کود فسفره همراه با غلظت ۲ میلی‌لیتر در لیتر آمینوکلات سیلیسیم دارای بیش‌ترین میزان کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل بود و به‌ترتیب سبب افزایش ۴۲/۳۰، ۴۲/۴۲ و ۴۲/۳۵ درصدی غلظت کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل نسبت به تیمار شاهد شدند. بر اساس نتایج مقایسات میانگین در سطح ۱۵ کیلوگرم در هکتار فسفر با

* **نویسنده مسئول:** ادریس شعبانی
رایانامه: edris.shabani@scu.ac.ir

افزایش غلظت آمینوکلات سیلیسیم تا سطح ۲ میلی‌لیتر در لیتر غلظت فسفر کل گیاه افزایش معنی‌داری یافت ولی مجدداً در سطح ۴ میلی‌لیتر در لیتر کاهش یافت، به‌گونه‌ای که بالاترین غلظت فسفر کل گیاه (۰/۹۸ درصد) در سطح ۱۵ کیلوگرم در هکتار فسفر و غلظت ۲ میلی‌لیتر در لیتر آمینوکلات سیلیسیم به‌دست آمد. بالاترین میزان وزن کل میوه (۵۹۹/۹۳ گرم) در تیمار ۱۵ کیلوگرم در هکتار فسفر و سطح ۴ میلی‌لیتر در لیتر آمینوکلات سیلیسیم و تیمار ۱۵ کیلوگرم در هکتار فسفر و سطح ۲ میلی‌لیتر در لیتر آمینوکلات سیلیسیم (۵۹۷/۴۳ گرم) مشاهده شد. تیمار ۱۵ کیلوگرم در هکتار فسفر و سطح ۲ میلی‌لیتر در لیتر آمینوکلات سیلیسیم در مقایسه با تیمار شاهد (صفر کیلوگرم در هکتار فسفر و سطح صفر میلی‌لیتر در لیتر آمینوکلات سیلیسیم) به‌ترتیب سبب افزایش ۶۷/۶۲ و ۶۸/۳۳ درصدی وزن کل میوه‌های توت‌فرنگی گردید. نتایج برهم‌کنش نشان داد که با افزایش غلظت فسفر تا سطح ۱۵ کیلوگرم در هکتار، درصد مادهٔ خشک میوه در سطوح ۲ و ۴ میلی‌لیتر در لیتر آمینوکلات سیلیسیم افزایش و مجدداً کاهش یافت. بیش‌ترین درصد مادهٔ خشک میوه (۷/۳۸ درصد) در تیمار ۱۵ کیلوگرم در هکتار فسفر و سطح ۲ میلی‌لیتر در لیتر آمینوکلات سیلیسیم مشاهده شد که تفاوت معنی‌داری با تیمار ۱۵ کیلوگرم در هکتار فسفر و سطح ۴ میلی‌لیتر در لیتر آمینوکلات سیلیسیم (۶/۹۷) نشان نداد. با توجه با این نتایج، استفاده از غلظت ۲ میلی‌لیتر در آمینوکلات سیلیسیم و سطح ۱۵ کیلوگرم در هکتار منوپتاسیم فسفات جهت دستیابی به حداکثر رشد، عملکرد و کیفیت میوه‌های توت‌فرنگی توصیه می‌شود.

کلیدواژه‌ها: تغذیهٔ گیاه، محتوای کلروفیل، محلول‌پاشی برگی، هدایت روزنه‌ای

مقدمه

توت‌فرنگی از ریزمیوه‌های مهم است که استفاده از آن به‌دلیل عطر و طعم مناسب، خواص بهداشتی و دارویی مورد توجه مصرف کنندگان قرار گرفته است. همچنین این محصول به شکل تازه‌خوری و فرآوری نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. مصرف توت‌فرنگی از نظر میزان بالای ترکیبات آنتی اکسیدانی، عناصر مغذی و ویتامین ث بسیار مورد توجه می‌باشد. مقادیر بالای آنتوسیانین موجود در گوشت میوهٔ توت‌فرنگی به عنوان یک ترکیب آنتی اکسیدان از اندام‌های بدن در برابر تخریب ترکیبات اکسیدان جلوگیری می‌نماید، همچنین فنول موجود در آن به دلیل خواص ضدالتهابی، ضد سرطانی و حفاظت از قلب و عروق کرونری توجه مصرف‌کنندگان را به خود جلب کرده است (Tulipani *et al.*, 2009).

از میان عناصر در طبیعت سیلیسیم پس از اکسیژن دومین عنصر (۲۸ درصد) فراوان پوستهٔ زمین می‌باشد (Ranjbar *et al.*, 2020). اگرچه در برخی منابع علمی به عنوان یک عنصر ضروری معرفی نشده است، اما در برخی از گیاهان به‌عنوان یک عنصر ضروری در نظر گرفته شده است. یافته‌های پژوهشگران نشان می‌دهد که این عنصر اثرات آشکاری بر شاخص‌های رشدی و عملکردی گیاهان دارد (Seyed lor *et al.*, 2013). سیلیسیم با قرارگیری در دیوارهٔ سلولی اپیدرم برگ‌ها و دیوارهٔ سلولی آوندهای چوبی به‌ترتیب مانع از دست دادن آب توسط تعرق کوتیکولی و فرو ریختن آوندها در شرایط تعرق شدید می‌گردد (Marschner, 1995). بررسی منابع علمی مختلف نشان می‌دهد که این عنصر سبب افزایش تحمل به تنش‌های زیستی و غیر زیستی، بهبود فعالیت‌های آنزیمی، بهبود عدم توازن مواد غذایی، کاهش سمیت مواد معدنی، بهبود ویژگی مکانیکی بافت‌های گیاه، افزایش جذب نور و فتوسنتز، افزایش شاخص‌های رشدی، عملکردی و کیفی محصولات، ارتقای بهره‌وری آب و ترسیب زیستی دی اکسیدکربن اتمسفر می‌گردد (Mali and Aery, 2008; Song *et al.*, 2013; Abdollahi *et al.*, 2024). استفاده از منابع مختلف سیلیسیم می‌تواند بر پروتئین‌های دخیل در مسیر فتوسنتز مؤثر باشد (Park *et al.*, 2018). در واقع

سیلیسیم اثرات سمی ناشی از تنش‌های غیرزیستی مانند تنش شوری، خشکی، فلزات سنگین، تابش اشعه ماورای بنفش و عدم تعادل مواد مغذی را کاهش می‌دهد. جالب توجه است که توانایی سیلیسیم برای کاهش تنش‌های مختلف حتی در گونه‌هایی با پتانسیل تجمع کم سیلیسیم مانند گوجه‌فرنگی نیز تأیید شده است (Luyckx *et al.,* 2017). همچنین این عنصر می‌تواند بر رشد زایشی گیاهان اثرگذار باشد. سیلیسیم با انباشت در دیواره‌های چوبی شده سلول‌ها بر پایداری آن‌ها اثرگذار است. همچنین سیلیسیم به عنوان یک مادهٔ ساختمانی به انرژی کمتری در مقایسه با لیگنین نیاز دارد. در نیشکر با کمبود سیلیسیم، کاهش قابل ملاحظه‌ای در ورود فسفات غیرآلی به ساختمان ترکیبات حاوی فسفر مانند ATP، ADP و قندهای دارای فسفات مشاهده گردید (Tabatabaei, 2013). محلول‌پاشی برگی برخی عناصر، سبب افزایش عملکرد و میزان قند میوه طی برداشت اولیه و میانهٔ فصل می‌گردد. بوته‌های جوان توت فرنگی انرژی خود را نه تنها به تولید برگ‌ها بلکه به توسعهٔ ریشه‌های جدید نیز اختصاص می‌دهند و بلافاصله تولید گل و میوه می‌نماید. در نتیجه تغذیهٔ برگی می‌تواند در زمان تشکیل و توسعهٔ قسمت ریشه گیاهان بسیار مفید واقع می‌گردد (Molaie *et al.,* 2018). در مقایسه با کودهای معمولی در کشاورزی، آمینوکلات‌ها شکل کارآمدتری از کود هستند و به عملکرد بهتر گیاه و کاهش خطرات زیست محیطی منجر می‌شوند. با توجه به این که آمینوکلات‌ها به‌سرعت در بازارهای کود در بسیاری از کشورها توسعه پیدا کردند، ولی اطلاعات علمی کافی در مورد پاسخ دقیق محصولات به این نوع کودها وجود ندارد (Souri and Yarahmadi, 2016). آمینواسیدها به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم در افزایش رشد و عملکرد گیاهان مؤثر هستند (Ghoname et *al.,* 2012). آمینواسیدها ترکیبات شیمیایی آلی و واحدهای سازنده پروتئین‌ها می‌باشند و دارای نقش‌های ساختاری، متابولیکی و انتقال در گیاهان هستند (Liu *et al.,* 2008). آمینو اسیدها پیش‌سازهای فیتوهورمون‌ها می‌باشند. به‌طور کلی اسیدهای آمینه باعث بهبود متابولیسم گیاه جهت افزایش عملکرد، افزایش کیفیت محصول، افزایش تحمل گیاه به تنش‌های غیرزیستی، تسهیل و بهبود جذب، انتقال و استفاده از مواد مغذی و همچنین افزایش ویژگی‌های کیفی محصول می‌شوند (Calvo *et al.,* 2014). با توجه به موارد مطرح شده، بهره جستن از غلظت‌های مختلف آمینوکلات سیلیسیم در تیمارهای تغذیه‌ای محصولات گلخانه‌ای مانند توت‌فرنگی می‌تواند نتایج رضایت بخشی را به همراه داشته باشد که لزوم بررسی آن با توجه به افزایش چشمگیر قیمت کودهای فسفره، بسیار ضروری به نظر می‌رسد.

فسفر یک عنصر کلیدی در تغذیه گیاه است که بر رشد و بهره‌وری گیاه اثر زیادی دارد. دسترسی فسفر موجود در خاک به دو دلیل بسیار کم است: تثبیت فسفر به اشکال آلی و همچنین تثبیت به‌وسیله اکسیدهای آلومینیوم و آهن در خاک‌های اسیدی و مواد معدنی نظیر کلسیم در خاک‌های آهکی که در هر دو مورد میزان شدت آن به pH خاک بستگی دارد. راهبردهای حیاتی برای بهبود عملکرد محصول در خاک‌های با کمبود فسفر، بهبود راندمان جذب فسفر از طریق افزایش در دسترس بودن فسفر خاک و افزایش کارایی استفاده از فسفر در اندام‌های داخلی گیاه است (Hu *et al.,* 2021). تنش بیش از حد فسفر نیز در برخی از خاک‌های گلخانه‌ای که در معرض کاربرد زیاد کود فسفر قرار می‌گیرند یا در کشت هیدروپونیک که غلظت فسفر بالایی دارد، مشاهده می‌شود. اثر مفید سیلیسیم بر کمبود فسفر یا تنش اضافی برای تعدادی از گونه‌های گیاهی گزارش شده است (Hu *et al.,* 2021).

عمده خاک‌های ایران جز خاک‌های آهکی به‌حساب می‌آید. در این نوع خاک‌ها با افزایش pH خاک میزان جذب فسفر کاهش می‌یابد. بنابراین یکی از مشکلات عمده در خاک‌های آهکی ایران کمبود فسفر می‌باشد (Roozitalab *et al.,* 2018). کاهش مقادیر فسفر در سیتوپلاسم و در نتیجه کاهش مقدار آن در کلروپلاست، سبب ایجاد اخلال در روند فعالیت های فتوسنتزی گیاه می‌شود (Rao *et al.,* 1989; Shabani *et al.,* 2018). از

طرفی میزان غلظت فسفر در محلول خاک محدوده بین ۰/۰۰۱ تا ۱ میلی گرم در لیتر و تحرک فسفر قابل دسترس گیاه در خاک (۰/۳ سانتی‌متر در سال) بسیار کم است (Shabani *et al.*, 2018). جذب فسفر از سطح ریشه به سرعت اتفاق می‌افتد و در نتیجه آن محدوده ۱-۰/۲ میلی متری اطراف ریشه خالی از فسفر می‌شود. بنابراین استفاده از کودهای حاوی فسفر در طول دورهٔ رشد در منطقه ریزوسفر گیاه انکارناپذیر است (Mikkelsen, 2013). گیاه در مراحل آغازین رشد، فسفر قابل جذب خاک را به سرعت استفاده می‌کند اما در مراحل بعدی از انواع فسفری که به اشکال قابل جذب در خاک درآمده است، استفاده می‌کنند (Mosali *et al.*, 2006). با توجه به مطالب گفته شده، مشخص نمودن مقدار دقیق فسفر مورد نیاز جهت حصول حداکثر عملکرد و تغذیه بهینه طی رشد گیاه به دلیل شرایط پیچیده خاک امری دشوار است. به طور معمول در آغاز فصل رشد و زمان کاشت کل فسفر مورد نیاز در اختیار گیاه قرار می‌گیرد که در این روش به ویژه در ارقام پرمحصول در طول دورهٔ رشد معمولاً کمبود فسفر ملاحظه می‌گردد و یا به‌دلیل ثبیت از دسترس گیاه خارج می‌گردد (Gray, 1977). مصرف بیش از حد کودهای شیمیایی به منظور افزایش عملکرد محصولات کشاورزی در واحد سطح، موجب آلودگی‌های زیست محیطی، به ویژه آلودگی منابع خاک و آب شده است که با ورود به منابع غذایی انسان، سلامت جامعه بشری را تهدید می‌کند (Khavazi *et al.*, 2018). که در میان آن‌ها مصرف بیش از حد و نامتعادل کودهای فسفره قابل توجه می‌باشد. بنابراین انجام مطالعات مرتبط با کودهای شیمیایی به‌ویژه کودهای فسفره در محصولات گلخانه‌ای امری کاملاً ضرروری به‌نظر می‌رسد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در یک مجتمع گلخانه‌ای واقع در شهرستان ایذه استان خوزستان طی زمستان ۱۴۰۱ تا بهار ۱۴۰۲ انجام شد. گلخانه فوق دارای سازهٔ فلزی، پوشش پلاستیکی و فاقد سیستم گرمایشی بود. گیاهان در طول این آزمایش تحت دمای ۲±۲۳ درجهٔ سانتی‌گراد در روز و ۲±۱۵ درجهٔ سانتی‌گراد در شب، رطوبت نسبی ۵±۶۵ درصد و نور طبیعی خورشید رشد یافتند. در این آزمایش سطوح مختلف کود فسفر از منبع منوپتاسیم فسفات (۰ (P_1)، ۷/۵ (P_2)، ۱۵ (P_3) و ۳۰ (P_4) کیلوگرم در هکتار) در کرت‌های اصلی و سه سطح محلول‌پاشی آمینوکلات سیلیسیم (۰(S_1)، ۲ (S_2) و ۴ (S_3) میلی‌لیتر بر لیتر) در کرت‌های فرعی قرار گرفتند. این آزمایش به صورت طرح کرت‌های خرد شده و در قالب طرح پایهٔ بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا گردید.

رقم توت‌فرنگی مورد استفاده در این آزمایش از نوع پاروس بود. بوته‌های مورد نظر از یک واحد تولیدی در استان کردستان که بوته‌ها در آن نیاز سرمایی را گذرانده بودند، خریداری و پس از انتقال به گلخانه فوق الذکر در کرت‌های مشخص شده کشت گردید. نشاها قبل از کشت با قارچ کش مانکوزب به مقدار ۱۰۰ گرم در ۱۰۰ لیتر آب ضدعفونی شدند. بافت خاک گلخانهٔ مورد نظر از نوع لومی بود. درصد شن، لای، رس، کربن آلی و مادهٔ آلی به ترتیب ۴۴، ۳۷، ۱۹، ۱/۰۷ و ۱/۸۴ درصد و pH عصارهٔ گل اشباع برابر ۷/۳۵ و هدایت الکتریکی آن نیز ۱/۹۵ دسی زیمنس بر متر، فسفر قابل جذب در حدود ۱۱ پی‌پی‌ام و میزان سیلیسیم آن در حدود ۲/۴ درصد بود.

به منظور اجرای این آزمایش برای هر کرت اصلی چهار متر طول و ۶۰ سانتی‌متر عرض (عرض هر خط کاشت) در نظر گرفته شد. طول کرت‌های فرعی نیز یک متر در نظر گرفته شد به گونه‌ای که تعداد ۱۰ بوته توت‌فرنگی برای هر کرت فرعی در نظر گرفته شد. به منظور رعایت اثر حاشیه فاصلهٔ بین کرت‌های اصلی یک متر و فاصلهٔ بین کرت‌های فرعی نیم متر در نظر گرفته شد. بوته‌ها در طول فصل رشد به‌صورت هر ده روز یکبار با کودهای مرسوم و سطوح مختلف فسفر تغذیه شدند. کودهای مرسوم شامل تغذیه با کودهای نیترات کلسیم، سولفات پتاسیم، نیترات منیزیم، کلات آهن و محلول‌پاشی کود میکرو کامل بود. به‌منظور تأمین فسفر از کود

منوپتاسیم فسفات (KH_2PO_4) (۰-۵۲-۳۴) با نام تجاری Quali Max® از شرکت ردسا© و با گرید گلخانه‌ای استفاده گردید. این کود دارای ۲۲/۸ درصد فسفر خالص می‌باشد. سطوح مختلف کود فسفره (۰، ۷/۵، ۱۵ و ۳۰ کیلوگرم در هکتار) از کود فوق الذکر تأمین و پس از حل شدن در مخزن محلول غذایی توسط سیستم آبیاری و نوار تیپ پای بوته قرار گرفت. به طور متوسط در هر بار مقدار ۲۰-۱۵ لیتر محلول حاوی فسفر در ۱۰ دقیقه توسط سیستم آبیاری تأمین گردید. همچنین محلول‌پاشی آمینوکلات سیلیسیم با نام تجاری سیلیکامین® یا ارگانامین سیلیس به صورت هر دو هفته یکبار توسط دستگاه سمپاش به صورت کاربرد برگی با غلظت‌های ۰، ۲ و ۴ میلی‌لیتر بر لیتر بر بوته‌های مورد نظر در هر کرت آزمایشی اعمال گردید. کود مایع آمینوکلات سیلیسیم مورد استفاده در این آزمایش از شرکت ارگانامین© تامین شد. این محصول به صورت وزنی-وزنی حاوی ۱۴ درصد سیلیسیم و ۱/۴۳ درصد اسید آمینه‌های آزاد چپ گرد از جمله آسپارتیک اسید، ایزولوسین، آلانین، آرژنین، تیروزین، ترئونین، سیستئین، لیزین و غیره می باشد. همچنین pH محلول‌های غذایی در محدود ۶ توسط اسید نیتریک تنظیم گردید. عملیات هرس برگ در طول دورهٔ رشد انجام گردید. همچنین برای کنترل آفات از تله کارت زرد استفاده گردید.

در نهایت صفات رشدی و فیزیولوژیک بوته و ویژگی‌های کمی و کیفی میوه توت‌فرنگی در طول دورهٔرشد و پایان آزمایش مورد سنجش و بررسی قرار گرفت. با استفاده از روش Arnon (1976) اندازه‌گیری میزان کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و کارتنوئید با نمونه‌گیری تصادفی از برگ‌های بالغ توسعه‌یافته در زمان رشد زایشی انجام و عصاره‌گیری با استون صورت پذیرفت. بدین صورت که مقدار ۰/۱ گرم از نمونه برگ بالغ و تازه در هاون چینی با ۵ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد ساییده شد تا به صورت محلول یکنواختی درآمد. در نهایت با استفاده از استون ۸۰ درصد به حجم ۱۰ میلی‌لیتر رسانده شد و در مرحلهٔ بعد فالکون‌های حاوی نمونه برگ و استون در سانتریفیوژ با سرعت ۵۵۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۵ دقیقه قرار داده شد. میزان جذب نمونه‌ها در طول موج‌های ۶۶۳، ۶۴۵ و ۴۸۰ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر (UV-1201, Shimadzu, Japan) قرائت گردید. محاسبه میزان کلروفیل a، b، کل و کارتنویید از روابط زیر محاسبه شد:

$$\text{Chlorophyll a} = \frac{((12.7\times A663) - (2.69\times A645))\times V}{1000\times W}$$

$$\text{Chlorophyll b} = \frac{((22.9\times A645) - (4.68\times A663))\times V}{1000\times W}$$

$$\text{Total Chlorophyll} = \frac{((20.2\ A645) + (8.02\ A663))\times V}{1000\times W}$$

$$\text{Carotenoids} = \frac{(A480 + (0.114\ A663) - (0.638\ A645))\times V}{1000\times W}$$

به‌منظور تعیین هدایت‌روزنه‌ای نمونه‌های برگ هر تیمار بین ساعات ۹ تا ۱۱ صبح با استفاده از دستگاه پرومتر اندازه‌گیری و برحسب میلی‌مول بر مترمربع در ثانیه گزارش شد.

از هضم به روش سوزاندن خشک و ترکیب با اسید هیدروکلریک جهت اندازه‌گیری فسفر کل گیاه استفاده گردید (Chapman and Pratt, 1961). در این راستا ابتدا ۲ گرم نمونه گیاه خشک شده را با دقت ۰/۰۱ گرم توزین و در کروزه چینی ریخته شد و در کوره تا ۵۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد به مدت چهار ساعت حرارت داده و خاکستر حاصل را با آب مقطر کمی خیس کرده و ۱۰ میلی‌لیتر اسید هیدروکلریک دو مولار به آن اضافه و پس از اتمام فعل و انفعالات محتویات کروزه از کاغذ صافی به داخل بالن ژوژه صاف گردید. مقدار پنج سی‌سی از محلول عصاره حاصل از هضم را به داخل بالن ژوژه ۲۵ میلی‌لیتر ریخته و پنج سی‌سی به آن محلول آمونیوم مولیبدات-وانادات اضافه کرده و به حجم رسانده شد. سپس میزان جذب نمونه‌ها توسط دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۴۷۰ نانومتر قرائت و مقدار فسفر بخش

هوایی و ریشه محاسبه گردید و در نهایت با تجمیع آن‌ها، غلظت فسفر کل گیاه به دست آمد.

در طول آزمایش میوه‌های توت فرنگی از تیمارهای مختلف برداشت و شمارش گردید. برداشت میوه زمانی انجام شد که سه چهارم هر میوه رنگ گرفته بودند. وزن تک میوه توسط ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ گرم اندازه گیری شد. وزن کل میوه در هر بوته نیز از تجمیع وزن میوه‌های برداشت شده در طول دوره رشد محاسبه و ثبت گردید. جهت محاسبهٔ درصد مادهٔ خشک میوه، ابتدا میوه‌های توت‌فرنگی هر تیمار توزین و سپس در داخل پاکت کاغذی قرار داده شد، سپس نمونه‌ها درون آون در دمای ۷۰ درجهٔ سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت قرار داده شد و پس از ثابت شدن وزن، با ترازوی دیجیتالی مجدداً توزین شد. سپس درصد ماده خشک میوه با استفاده از تقسیم وزن خشک نمونه بر وزن تر نمونه ضربدر ۱۰۰ محاسبه گردید (Tabatabaei, 2013). در طول آزمایش، میوه‌ها از تیمارهای مختلف برداشت شده و طول و قطر آن ها توسط کولیس اندازه‌گیری و بر حسب سانتی‌متر گزارش گردید. میزان سفتی بافت میوه توسط دستگاه سفتی‌سنج (Santam, STM-1, Iran) اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری از قسمت میانی میوه انجام شد و با پروب آلومینیومی هشت میلی‌متری و سرعت ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه به میوه‌ای که روی یک سطح سخت قرار گرفته بود، فشار داده شد. در نهایت سفتی میوه بر حسب نیوتن گزارش شد. به‌منظور اندازه‌گیری هدایت الکتریکی و pH عصارهٔ میوه حدود ۱۰ گرم از گوشت میوه در هاون کوبیده و با آب مقطر به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده سپس در سانتریفیوژ با دور ۶۰۰۰ به مدت ۱۵ دقیقه قرار داده شد و قسمت زیری نمونه را دور ریخته و روشناور نمونه را جدا کرده و به‌عنوان عصارهٔ میوه مورد استفاده قرار گرفت. هدایت الکتریکی و pH عصارهٔ میوه توسط دستگاه هدایت سنج و pH متر قرائت و گزارش شد. عصارهٔ میوه‌هایی که به طور جداگانه از هر تکرار جمع آوری شده بود، روی دستگاه رفرکتومتر (Atago,A-PAL-1, Japan) قرار گرفت و درصد مواد جامد محلول کل (TSS) بر اساس درصد بریکس قرائت شد. در پایان آزمایش داده‌ها با استفاده از نرم افزار SAS نسخه ۹/۱ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و مقایسه میانگین تیمارها در سطح احتمال پنج درصد با آزمون چند دامنه‌ای دانکن انجام گردید. نمودارها نیز به کمک نرم افزار Excell رسم گردید.

نتایج و بحث

شاخص‌های فتوسنتزی و فیزیولوژیک توت‌فرنگی

نتایج حاصل از جدول آنالیز واریانس داده‌ها (جدول ۱) نشان داد که اثرات اصلی فسفر، آمینوکلات سیلیسیم و برهم‌کنش فسفر و آمینوکلات سیلیسیم بر میزان کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار گردید. در حالی‌که اثرات اصلی فسفر و برهم‌کنش فسفر و آمینوکلات سیلیسیم بر غلظت کارتنوئید های برگ به‌ترتیب در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود، اما اثرات اصلی آمینوکلات سیلیسیم تاثیر معنی‌داری بر غلظت کارتنوئیدهای برگ توت‌فرنگی نداشته است. اثرات اصلی فسفر و آمینوکلات سیلیسیم بر هدایت روزنه‌ای در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بوده است. همچنین اثر متقابل فسفر و آمینوکلات سیلیسیم بر هدایت روزنه ای در سطح احتمال ۵ درصد معنی دار گردید (جدول ۱).

با توجه به نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌ها (جدول ۲) کاربرد فسفر موجب افزایش غلظت کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و کارتنوئید برگ‌های توت فرنگی گردید، به‌طوری که این افزایش در سطوح ۷/۵ و ۱۵ کیلوگرم در هکتار نسبت به شاهد معنی‌دار شد. کاربرد آمینوکلات سیلیسیم در هر دو غلظت ۲ و ۴ میلی‌لیتر در لیتر موجب افزایش معنی‌دار میزان کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل نسبت به شاهد شد اما بین غلظت ۲ و ۴ میلی‌لیتر در لیتر تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. میزان کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل تحت تأثیر برهم‌کنش فسفر و آمینوکلات سیلیسیم قرار گرفت، به‌طوری که کاربرد ۱۵ کیلوگرم در هکتار فسفر همراه با غلظت ۲ میلی‌لیتر در لیتر

آمینوکلات سیلیسیم (P_3Si_2) دارای بیش‌ترین میزان کلروفیل a (۱/۴۸ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) کلروفیل b (۰/۹۴ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) و کلروفیل کل (۲/۴۲ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) بود و به‌ترتیب سبب افزایش ۴۲/۳۰، ۴۲/۴۲ و ۴۲/۳۵ درصدی کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل نسبت به تیمار شاهد شدند. همچنین تفاوت معنی‌داری بین تیمار P_3Si_2 با P_2Si_3 و P_2Si_3 در غلظت کلروفیل‌های برگ توت‌فرنگی مشاهده نگردید (جدول ۲). کمترین میزان کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل نیز در غلظت ۴ میلی‌لیتر در لیتر آمینوکلات بدون کاربرد فسفر مشاهده شد (جدول ۲). همچنین همانند کلروفیل‌ها، بالاترین میزان کارتنوئید برگ در تیمار P_3Si_2 مشاهده گردید، اما پایین‌ترین میزان آن در تیمار شاهد به دست آمد (جدول ۲).

نتایج مقایسات میانگین اثرات اصلی فسفر و آمینوکلات سیلیسیم نشان داد که با افزایش غلظت فسفر و سیلیسیم هدایت روزنه‌ای به‌طور معنی‌داری افزایش یافت و بیش‌ترین میزان هدایت روزنه‌ای در بالاترین غلظت‌های این دو ترکیب مشاهده گردید (جدول ۱). فتوسنتز تحت اثر عوامل روزنه‌ای و غیر روزنه‌ای قرار می‌گیرد وهدایت روزنه‌ای به عنوان یکی از شاخص‌های مهم ارزیابی وضعیت آبی گیاه محسوب می‌گردد (Rahnama *et al.*, 2010; Rahnama *et al.*, 2024). نتایج برهم‌کنش غلظت‌های مختلف فسفر و آمینوکلات سیلیسیم نشان داد که در سطوح صفر و ۲ میلی‌لیتر در لیتر آمینوکلات سیلیسیم با افزایش غلظت فسفر تا سطح ۱۵ کیلوگرم در هکتار، هدایت روزنه‌ای برگ‌های توت‌فرنگی به‌طور معنی‌داری افزایش (به غیر از سطح ۷/۵ کیلوگرم در هکتار) و سپس در سطح ۲ میلی‌لیتر در لیتر آمینوکلات سیلیسیم مجدداً کاهش یافت (جدول ۲)، اگرچه در غلظت ۴ میلی‌لیتر در لیتر آمینوکلات سیلیسیم بالاترین میزان هدایت روزنه‌ای در سطح ۳۰ کیلوگرم در هکتار منوپتاسیم فسفات مشاهده گردید (جدول ۲).

بر اساس نتایج تجزیه واریانس، اثرات اصلی فسفر، آمینوکلات سیلیسیم و برهم‌کنش فسفر و آمینوکلات سیلیسیم بر غلظت فسفر کل شاخساره در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار گردید (جدول ۱). نتایج مقایسات میانگین نشان داد که در سطوح مختلف اعمال کود منوپتاسیم فسفات، با افزایش غلظت فسفر تا سطح ۱۵ کیلوگرم در هکتار غلظت فسفر بوته‌های توت‌فرنگی به‌طور معنی‌داری افزایش یافت و مجدداً در سطح ۳۰ کیلوگرم در هکتار کاهش یافت. پایین‌ترین غلظت فسفر در تیمار شاهد آمینوکلات سیلیسیم و بالاترین غلظت فسفر در تیمار ۲ میلی‌لیتر در لیتر آمینوکلات سیلیسیم مشاهده گردید (جدول ۲). بر اساس نتایج مقایسات میانگین در سطوح ۰ و ۷/۵ کیلوگرم در هکتار منوپتاسیم فسفات با افزایش غلظت آمینوکلات سیلیسیم، غلظت فسفر کل گیاه افزایش یافت، در سطح ۱۵ کیلوگرم در هکتار نیز با افزایش غلظت آمینوکلات سیلیسیم تا سطح ۲ میلی‌لیتر در لیتر غلظت فسفر کل گیاه افزایش معنی داری یافت ولی مجدداً در سطح ۴ میلی‌لیتر در لیتر کاهش یافت، به‌گونه‌ای که بالاترین غلظت فسفر کل گیاه (۰/۹۸ درصد) در سطح ۱۵ کیلوگرم در هکتار فسفر و غلظت ۲ میلی‌لیتر در لیتر آمینوکلات سیلیسیم به‌دست آمد (P_3Si_2) که سبب افزایش ۲۲/۵ درصدی غلظت فسفر بوته‌های توت‌فرنگی نسبت به غلظت صفر آمینوکلات سیلیسیم در همین سطح فسفر گردید (P_3Si_1) (شکل ۱). در سطح ۳۰ کیلوگرم در هکتار منوپتاسیم فسفات، نتایج متفاوت از سایر سطوح بود ، به‌گونه‌ای که با افزایش غلظت آمینوکلات سیلیسیم غلظت فسفر کل گیاه کاهش معنی‌داری یافت (شکل ۱). علاوه بر این غلظت فسفر کل بوته‌های توت‌فرنگی در سطح ۷/۵ کیلوگرم در هکتار فسفر و محلول‌پاشی ۲ و ۴ میلی‌لیتر در لیتر آمینوکلات سیلیسیم (به‌ترتیب ۰/۶۲ و ۰/۶۴ درصد) تفاوت معنی‌داری با سطح ۳۰ کیلوگرم در هکتار فسفر و بدون محلول‌پاشی آمینوکلات سیلیسیم (۰/۶۶ درصد) نداشت که از نتایج قابل توجه این پژوهش می‌باشد (شکل ۱).

Table 1. Variance analysis of photosynthetic and physiological characteristics of strawberry under different levels of phosphorus fertilizer and Si-aminochelate

S.O.V	df	Chlorophyll a content	Chlorophyll b content	Total Chlorophyll content	Carotenoid content	Stomatal conductance	Total phosphorus
Block	2	0.02 ^{ns}	0.01 ^{ns}	0.07 ^{ns}	0.000 ^{ns}	1408.36 **	0.001 ^{ns}
Phosphorus (P)	3	0.13 **	0.05 **	0.36 **	0.025 **	1602.00 **	0.24 **
Error a	6	0.011	0.004	0.03	0.0002	285.02	0.0008
Si- aminochlate (Si)	2	0.15 **	0.05 **	0.41 **	0.001^{ns}	9307.44 **	0.009 **
P×Si	6	0.21 **	0.07 **	0.55 **	0.002 **	601.00 *	0.01 **
Error b	16	0.012	0.004	0.031	0.0005	177.02	0.0006
CV (%)	-	9.52	8.90	9.27	6.84	5.49	4.06

*,** and ns: Significant at 5% and 1% level probability and no significant, respectively.

Table 2. The main and interaction effects of phosphorus fertilizer and Si- aminochelate on the photosynthetic and physiological characteristics of strawberry

Treatment	Chlorophyll a content (mg g^{-1})	Chlorophyll b content (mg g^{-1})	Total Chlorophyll content (mg g^{-1})	Total Carotenoid content (mg g^{-1})	Stomatal conductance (mmol $m^{-2}s^{-1}$)
Phosphorus (Kg ha^{-1})					
0 (P_1)	1.03 ^{c}	0.65 ^{c}	1.69 ^{c}	0.28 ^{d}	240.00 ^{ab}
7.5 (P_2)	1.22 ^{ab}	0.77 ^{ab}	2.00 ^{ab}	0.35 ^{c}	224.66 ^{b}
15 (P_3)	1.32 ^{a}	0.84 ^{a}	2.16 ^{a}	0.40 ^{a}	248.55 ^{a}
30 (P_4)	1.12 ^{bc}	071 ^{bc}	1.83 ^{bc}	0.38 ^{b}	255.66 ^{a}
Si- aminochelate (mL L^{-1})					
0 (Si_1)	1.04 ^{b}	0.66 ^{b}	1.71 ^{b}	0.34	215.83 ^{c}
2 (Si_2)	1.25 ^{a}	0.79 ^{a}	2.05 ^{a}	0.36	239.50 ^{b}
4 (Si_3)	1.23 ^{a}	0.77 ^{a}	2.00 ^{a}	0.36	271.33 ^{a}
Phosphorus × Si-aminochelate					
P_1× Si_1	1.04 ^{b}	0.66 ^{c}	1.70 ^{c}	0.25 ^{g}	216.00 ^{fg}
P_2× Si_1	1.13 ^{b}	0.72 ^{bc}	1.85 ^{bc}	0.32 ^{de}	195.00 ^{g}
P_3× Si_1	0.99 ^{b}	0.64 ^{c}	1.63 ^{c}	0.38 ^{bc}	227.33 ^{def}
P_4× Si_1	1.00 ^{b}	0.63 ^{c}	1.64 ^{c}	0.40 ^{ab}	225.00 ^{ef}
P_1× Si_2	1.38 ^{a}	0.87 ^{a}	2.25 ^{a}	0.28 ^{fg}	240.00 ^{cdef}
P_2× Si_2	1.10 ^{b}	0.70 ^{c}	1.81 ^{c}	0.36 ^{cd}	230.00 ^{def}
P_3× Si_2	1.48 ^{a}	0.94 ^{a}	2.42 ^{a}	0.44 ^{a}	253.00 ^{bcd}
P_4× Si_2	1.04 ^{b}	0.66 ^{c}	1.70 ^{c}	0.37 ^{bcd}	235.00 ^{def}
P_1× Si_3	0.67 ^{c}	0.43 ^{d}	1.11 ^{d}	0.31 ^{ef}	264.00 ^{bc}
P_2× Si_3	1.43 ^{a}	0.90 ^{a}	2.33 ^{a}	0.38 ^{bc}	249.00 ^{bcde}
P_3× Si_3	1.48 ^{a}	0.93 ^{a}	2.41 ^{a}	0.39 ^{bc}	265.33 ^{b}
P_4× Si_3	1.33 ^{a}	0.83 ^{ab}	2.16 ^{ab}	0.36 ^{bcd}	307.00 ^{a}

Mean with same letter are not significantly different according to Duncan test ($p \leq 0.05$)

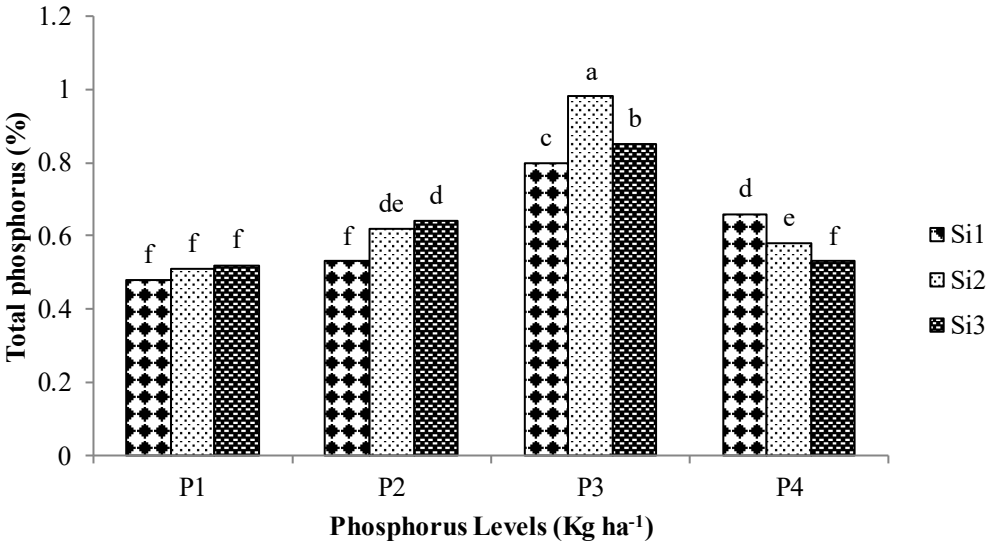


Figure 1. The interaction effect of phosphorus fertilizer and Si- aminochelate different levels on total phosphorus of strawberry

براساس نتایج کاربرد آمینوکلات سیلیسیم و فسفر موجب افزایش میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی از قبیل کلروفیل و کاروتنوئید و بهبود وضعیت هدایت روزنه‌ای توت فرنگی شد (جدول ۲). این نتایج با یافته‌های سایر پژوهشگران مطابقت داشت (Li *et al.,* 2021). بر اساس نتایج آن‌ها، استفاده از فسفر مواد تولیدکنندهٔ کلروفیل از جمله جذب عناصر غذایی را افزایش و در نتیجه میزان این رنگیزه را افزایش می‌دهد که موجب بهبود توانایی فتوسنتزی گیاه می‌گردد. یافته‌های پژوهشگران نشان داد که افزودن فسفر باعث تحریک متابولیسم گیاه، افزایش غلظت کلروفیل a و b، اسیدهای آمینه کل و پروتئین‌ها در برگ شد (El-Bassiony *et al.,* 2010). همچنین Souri (2016) گزارش کرد که آمینوکلات‌ها جدیدترین ترکیبات در تغذیهٔ گیاه و تولیدات کشاورزی هستند که موجب افزایش میزان کلروفیل می‌شوند. سیلیسیم از طریق جلوگیری از تخریب کلروفیل، افزایش کارایی فتوسیستم II، فعالیت آنزیم ریبولوز بیس فسفات کربوکسیلاز و به دنبال آن افزایش فعالیت چرخهٔ کلوین موجب افزایش میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی از جمله کلروفیل می‌شود (Al-aghabary *et al.,* 2005). کاربرد سیلیسیم موجب افزایش میزان تبادلات گازی می‌شود که مرتبط با ساختار برگ، افزایش محتوای کلروفیل و فعالیت ریبولوز بیس فسفات کربوکسیلاز می‌باشد (Romero-Aranda *et al.,* 2006). سیلیسیم در چرخه‌های کالوین، تری کربوکسیلیک اسید و پنتوز فسفات ادغام می‌شود و باعث تحریک پروتئین‌های مربوط به فتوسنتز می شود و محافظت نوری گیاهان را تضمین می‌کند (Pinedo-Guerrero et al., 2020). یافته‌های قبلی نشان داد که دسترسی ارتوفسفات در تیمارهای فسفری می‌تواند از طریق اسیدی کردن ریزوسفر توسط جریان H^+ و ترشح اسیدهای آلی افزایش یابد (Shabani, 2023). یک راهبرد مؤثر برای مقابله با تنش کمبود فسفر، ترشح آنیون‌های اسید آلی (مانند مالات، سیترات و اگزالات) توسط ریشه‌های گیاه است (Hu et al., 2021) شواهد کنونی نشان می‌دهد که کاربرد سیلیسیم به‌شدت باعث افزایش ترشح مالات و سیترات توسط ریشه می‌شود، به‌طوری که مقدار این آنیون‌های آزاد شده توسط ریشه همیشه بیشتر از سایر تیمارهای آزمایش‌شده بود (Kostic *et al.,* 2017). بر اساس یافته های پژوهشگران، یک همبستگی مثبتی بین

دسترسی سیلیسیم و تحرک فسفر در گیاه وجود دارد. علاوه بر این، استعمال خارجی سیلیسیم نیز به افزایش فعال‌سازی فسفر از فازهای Fe-P در سطوح معدنی کمک می‌کند (Schaller *et al.*, 2019). بسیاری از مطالعات نشان داده‌اند که افزایش در دسترس بودن فسفر خاک تحت سیلیسیم بالا را می‌توان با رقابت سیلیسیم با فسفر برای اتصال در سطح مواد معدنی خاک که منجر به تحرک فسفر می‌شود، توضیح داد (Neu *et al.*, 2017). بر اساس یافته‌های قبلی، توانایی رقابتی سیلیسیم در برابر فسفر ممکن است وابسته به pH باشد. اثر سیلیسیم بر تحرک فسفر خاک ممکن است به شکل کود سیلیسیم ، سطح سیلیسیم ، کانی‌شناسی خاک و جذب فسفر گیاه بستگی داشته باشد (Hu *et al.*, 2021). همچنین کاهش جذب فسفر در سطوح بالای فسفر و تحت کاربرد سیلیسیم نیز در کشت هیدروپونیک برنج گزارش گردید که منطبق با یافته‌های این آزمایش می باشد (Ma and Takahashi, 1990).

شاخص‌های عملکردی توت‌فرنگی

براساس نتایج حاصل از جدول آنالیز واریانس داده‌ها وزن تک میوه، تعداد میوه و وزن کل میوه تحت تأثیر اثرات اصلی فسفر در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار گردید (جدول ۳). اثرات اصلی سیلیسیم بر وزن تک میوه و وزن کل میوه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار گردید اما بر تعداد میوه تاثیر معنی‌داری نداشته است. همچنین اثرات متقابل فسفر و آمینوکلات سیلیسیم بر وزن تک میوه و وزن کل میوه به‌ترتیب در سطح احتمال یک و پنج درصد معنی‌دار شد اما در تعداد میوه‌های توت‌فرنگی اختلاف معنی‌داری مشاهده نگردید (جدول ۳).

وزن تک میوه و وزن کل میوه تحت اثر افزایش غلظت فسفر افزایش یافت و در غلظت ۱۵ کیلوگرم در هکتار به بالاترین میزان رسید، به گونه‌ای که به‌ترتیب سبب افزایش ۸۶/۱۳ و ۳۶/۴۸ درصدی وزن تک میوه و وزن کل میوه نسبت به تیمار شاهد شد (جدول ۴). روند تعداد میوه ولی تحت اثر افزایش غلظت فسفر معکوس بوده و با افزایش غلظت فسفر روند کاهشی را به نمایش گذاشت (جدول ۴). همچنین تحت اثر محلول‌پاشی آمینوکلات سیلیسیم بیشترین وزن تک میوه در تیمار ۴ میلی لیتر در لیتر مشاهده شد که تفاوت معنی داری با تیمار ۲ میلی‌لیتر در لیتر نداشت و بیشترین وزن کل میوه (۵۲۶/۱۵ گرم) نیز در تیمار ۴ میلی‌لیتر در لیتر مشاهده شد (جدول ۴).

برهم‌کنش فسفر و آمینوکلات سیلیسیم وزن تک میوه را افزایش داد که این افزایش در اکثر موارد نسبت به شاهد معنی‌دار بود. در بین همه تیمارها بیشترین وزن تک میوه (۳۳/۸۷ گرم) مربوط به تیمار ۱۵ کیلوگرم در هکتار فسفر همراه با محلول‌پاشی ۲ میلی‌لیتر بر لیتر آمینوکلات سیلیسیم بود که از نظر آماری اختلاف معنی داری با تیمار ۱۵ کیلوگرم در هکتار فسفر و سطح ۴ میلی‌لیتر در لیتر آمینوکلات سیلیسیم نداشت (۳۱/۶۱ گرم) (جدول ۴). در تمام سطوح محلول‌پاشی آمینوکلات سیلیسیم با افزایش غلظت فسفر تا سطح ۱۵ کیلوگرم در هکتار، وزن کل میوه به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. بالاترین میزان وزن کل میوه (۵۹۹/۹۳ گرم) در تیمار ۱۵ کیلوگرم در هکتار فسفر و سطح ۴ میلی‌لیتر در لیتر آمینوکلات سیلیسیم مشاهده گردید که تفاوت معنی‌داری با تیمار ۱۵ کیلوگرم در هکتار فسفر و سطح ۲ میلی‌لیتر در لیتر آمینوکلات سیلیسیم نداشت (جدول ۴). تیمار P_3Si_2 و P_3Si_3 در قیاس با تیمار شاهد (P_1Si_1) به‌ترتیب سبب افزایش ۶۷/۶۲ و ۶۸/۳۳ درصدی وزن کل میوه‌های توت‌فرنگی گردید (جدول ۴).

Table 3. Variance analysis of yield characteristics of strawberry under different levels of phosphorus fertilizer and Si- aminochelate

S.O.V	df	Single fruit weight	Number of fruit	Total fruit weight
Block	2	0.75 ^{ns}	1.75 ^{ns}	21.87 ^{ns}
Phosphorus (P)	3	377.81 **	76.66 **	41558.04 **
Error a	6	1.01	1.86	4.66
Si- aminochlate (Si)	2	21.35 **	0.00 ^{ns}	13779.20 **
P×Si	6	6.04 **	2.00 ^{ns}	3101.96 **
Error b	16	2.19	2.45	23.12
CV(%)	-	6.57	6.71	0.96

*,** and ns: Significant at 5% and 1% level probability and no significant, respectively.

Table 4. The main and interaction effects of phosphorus fertilizer and Si-aminochelate on the yield characteristics of strawberry

Treatment	Single fruit weight (g)	Number of fruit	Total fruit weight (g plant^{-1})
Phosphorus (Kg ha^{-1})			
0 (P_1)	17.09 ^{d}	24.11 ^{b}	419.51 ^{d}
7.5 (P_2)	21.74 ^{b}	21.44 ^{c}	472.95 ^{c}
15 (P_3)	31.81 ^{a}	20.66 ^{c}	572.56 ^{a}
30 (P_4)	19.43 ^{c}	27.11 ^{a}	537.12 ^{b}
Si- aminochlate (mL L^{-1})			
0 (Si_1)	20.98 ^{b}	23.33	462.11 ^{c}
2 (Si_2)	23.24 ^{a}	23.33	513.34 ^{b}
4 (Si_3)	23.24 ^{a}	23.33	526.15 ^{a}
Phosphorus × Si-aminochlate			
P_1× Si_1	15.13 ^{e}	23.33	356.40 ^{i}
P_2× Si_1	19.57 ^{d}	22.00	430.80 ^{g}
P_3× Si_1	29.96 ^{b}	20.33	520.33 ^{d}
P_4× Si_1	19.27 ^{d}	27.66	540.93 ^{c}
P_1× Si_2	16.40 ^{e}	25.00	418.76 ^{h}
P_2× Si_2	23.00 ^{c}	20.66	487.00 ^{f}
P_3× Si_2	33.87 ^{a}	20.33	597.43 ^{a}
P_4× Si_2	19.69 ^{d}	27.33	550.16 ^{b}
P_1× Si_3	19.75 ^{d}	24.00	483.36 ^{f}
P_2× Si_3	22.66 ^{c}	21.66	501.06 ^{e}
P_3× Si_3	31.61 ^{ab}	21.33	599.93 ^{a}
P_4× Si_3	19.35 ^{d}	26.33	520.26 ^{d}

Mean with same letter are not significantly different according to Duncan test ($p \leq 0.05$)

مطابق با نتایج به‌دست آمده، استفاده از فسفر موجب بهبود خصوصیات کمی و کیفی میوه در توت‌فرنگی گردید. کاربرد فسفر به‌علت افزایش میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی و سهولت جذب عناصر غذایی از جمله پتاسیم، عملکرد و کیفیت محصولات را افزایش می‌دهند (Khan *et al.,* 2000). عملکرد محصولات به عواملی ازجمله رشد زایشی و وزن میوه بستگی دارد. تغذیهٔ فسفر برعکس نیتروژن که رشد رویشی را افزایش می‌دهد و رشد زایشی را به تأخیر می اندازد، موجب ایجاد تعادل در رشد رویشی و زایشی می‌گردد که درنهایت موجب بهبود عملکرد می‌گردد. به طور کلی فسفر نقش عمده‌ای در افزایش گلدهی زودرس، تشکیل و بلوغ میوه دارد، همچنین باعث افزایش تولید میوه می‌شود (Ahmad *et al.,* 2017). فسفر رشد سالم ریشه را افزایش می‌دهد که

به استفاده مؤثر از آب و مواد مغذی کمک می‌کند و از این طریق رشد ساقه و شاخ و برگ و تولید رنگیزه های فتوسنتزی را افزایش می‌دهد. در نتیجه باعث افزایش تولید گل و میوه می‌گردد (Ahmad *et al.*, 2017). مشخص شده است که محلول‌پاشی برگی عناصر در طول رشد محصول می‌تواند وضعیت معدنی گیاهان را بهبود بخشد و عملکرد و کیفیت محصول را افزایش دهد (El-Bassiony *et al.*, 2010). در بسیاری از مطالعات، افزایش عملکرد پس از استفاده از محلول‌پاشی با سیلیسیم مشاهده شد که این ناشی از بهبود همه یا برخی از اجزای عملکرد بود. در مورد بیشتر غلات کاربرد این ترکیب تراکم سنبله در هنگام برداشت، تعداد دانه در هر سنبله و وزن هزار دانه را افزایش داد (Artyszak, 2018). کاربرد سیلیسیم باعث افزایش عملکرد تجاری گوجه فرنگی و کاهش بروز میوه‌های ترک خورده شد (Liang *et al.*, 2015). بهبود کیفیت و افزایش عملکرد میوه‌ها در اثر استفاده از سیلیسیم می‌تواند به علت نقش این عنصر مفید در افزایش تعداد گل و میوه در هر بوته، افزایش سفتی و سالم بودن میوه‌ها باشد (Artyszak, 2018). بر اساس نتایج مطالعه‌ای، با کاربرد ریشه‌ای و محلول‌پاشی سیلیسیم بر توت‌فرنگی در شرایط تنش شوری، دیواره‌های سلول‌های روپوست با لایه‌های محکم سیلیسیم آغشته و در برابر از دست رفتن آب به‌وسیله تعرق کوتیکولی محافظت می‌شوند. افزون بر دیواره‌های سلولی روپوست برگ‌ها، سیلیسیم در دیواره‌های سلول آوند چوبی نیز قرار می‌گیرد و از فروریختن آوندها در شرایط تعرق زیاد جلوگیری و از این طریق به بهبود عملکرد گیاه کمک می‌کند (Khosrofard *et al.*, 2017).

شاخص‌های کمی و کیفی میوه توت‌فرنگی

اثرات اصلی فسفر در سطح احتمال پنج درصد بر میزان درصد ماده خشک میوه و pH عصاره میوه و در سطح احتمال یک درصد بر طول، قطر، سفتی، هدایت الکتریکی عصارهٔ میوه و مواد جامد محلول کل میوه توت‌فرنگی معنی‌دار بود (جدول ۵). همچنین اثر اصلی آمینوکلات سیلیسیم در سطح احتمال پنج درصد بر قطر و مواد جامد محلول کل میوه و در سطح احتمال یک درصد بر درصد مادهٔ خشک، طول و سفتی میوه معنی‌دار بود، اما اثر معنی‌داری بر هدایت الکتریکی و pH عصارهٔ میوه‌های توت‌فرنگی نداشت (جدول ۵). بر اساس نتایج برهم‌کنش فسفر و آمینوکلات سیلیسیم بر درصد مادهٔ خشک و pH عصارهٔ میوه در سطح احتمال یک درصد معنی دار بوده است، اما اثر معنی‌داری بر طول، قطر، سفتی، هدایت الکتریکی و مواد جامد محلول کل میوه به نمایش نگذاشت (جدول ۵).

با افزایش غلظت فسفر تا سطح ۱۵ کیلوگرم در هکتار، درصد مادهٔ خشک میوه، طول، قطر و سفتی و مواد جامد محلول کل میوه‌های توت‌فرنگی افزایش یافت، اما افزایش غلظت این عنصر به ۳۰ کیلوگرم در هکتار باعث کاهش معنی‌دار این شاخص‌ها گردید (شکل ۲ و جدول ۶). مقایسه میانگین داده‌های اثرات اصلی نشان داد که کاربرد فسفر در غلظت ۷/۵ و ۱۵ کیلوگرم در هکتار موجب افزایش معنی‌دار هدایت الکتریکی عصارهٔ میوه گردید و در غلظت ۷/۵ کیلوگرم به بیشترین میزان رسید که افزایش ۱۷/۱۸، ۸/۶۹ و ۱۹/۰۴ درصدی به‌ترتیب نسبت به غلظت صفر، ۱۵ و ۳۰ کیلوگرم در هکتار فسفر داشت (جدول ۶). نتایج نشان داد افزایش غلظت فسفر موجب افزایش معنی‌دار pH عصاره میوه گردید (جدول ۶). با توجه به مقایسات میانگین اثرات اصلی آمینوکلات سیلیسیم، درصد مادهٔ خشک، طول و قطر میوه تا سطح ۲ میلی‌لیتر در لیتر افزایش و مجدداً در سطح ۴ میلی‌لیتر در لیتر کاهش یافت، در حالی‌که سفتی و مواد جامد محلول کل میوه با افزایش سطوح محلول‌پاشی آمینوکلات سیلیسیم افزایش یافت و بیش‌ترین مقادیر در سطح ۴ میلی‌لیتر در لیتر مشاهده گردید (جدول ۶).

برهم‌کنش غلظت‌های مختلف فسفر و آمینوکلات سیلیسیم نشان داد که درصد ماده خشک میوه در سطوح

۲ و ۴ میلی‌لیتر در لیتر آمینوکلات سیلیسیم با افزایش غلظت فسفر تا سطح ۱۵ کیلوگرم در هکتار افزایش و مجدداً کاهش یافت (جدول ۶). بالاترین درصد مادهٔ خشک میوه (۷/۳۸ درصد) در تیمار P_3Si_2 مشاهده گردید که تفاوت معنی‌داری با تیمارهای P_2Si_2 (۷/۲۷ درصد) و P_3Si_3 (۶/۹۷) نشان نداد. برهم‌کنش فسفر و آمینوکلات سیلیسیم بر pH عصارهٔ میوه روند متفاوت‌تری را به نمایش گذاشت. به گونه‌ای که در محلول‌پاشی با غلظت صفر آمینوکلات سیلیسیم (شاهد) بیش‌ترین pH عصارهٔ میوه در غلظت ۱۵ کیلوگرم در هکتار فسفر، در محلول‌پاشی با غلظت ۲ میلی‌لیتر در لیتر آمینوکلات سیلیسیم بیش‌ترین pH عصارهٔ میوه در غلظت ۳۰ کیلوگرم در هکتار فسفر و در محلول‌پاشی با غلظت ۴ میلی‌لیتر در لیتر آمینوکلات سیلیسیم بیش‌ترین pH عصارهٔ میوه در غلظت ۷/۵ کیلوگرم در هکتار فسفر مشاهده گردید (جدول ۶). در بالاترین غلظت آمینوکلات سیلیسیم (۴ میلی‌لیتر بر لیتر) همراه با کاربرد فسفر ۷/۵ کیلوگرم در هکتار (P_2Si_3) بیشترین میزان pH عصاره میوه (۳/۳۷) مشاهده شد که نسبت به اغلب تیمارها معنی‌دار گردید و افزایش ۸/۳۶ درصدی را نسبت به شاهد داشت (جدول ۶). همچنین اختلاف معنی‌داری بین تیمار P_2Si_3 با تیمارهای P_3Si_1، P_4Si_1 و P_4Si_2 مشاهده نگردید (جدول ۶).

کیفیت میوه توت‌فرنگی به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر نسبت قند و اسید قرار دارد. افزایش نسبت قند به اسید منجر به طعم بهتر در میوه‌ها می‌گردد (Wuzhong, 2002). همچنین Ahmad *et al.* (2017) در نتایج حاصل از پژوهش خود بیان کردند که بیشترین مواد جامد محلول و کمترین pH در میوه‌های تیمار شده با بالاترین غلظت فسفر به‌دست آمد. اضافه کردن فسفر برخی از ویژگی های مرتبط با کیفیت میوه توت فرنگی از جمله قندهای محلول کل و سفتی بافت میوه را بهبود بخشید (Estrada-Ortiz *et al.*, 2013). بهبود کیفیت و افزایش اندازه میوه در توت‌فرنگی می‌تواند به علت اثر فسفر در افزایش فعالیت آدنوزین تری فسفات باشد. ATP، انرژی مورد نیاز برای سنتز نشاسته را تأمین می‌نماید. این ATPهای غنی از انرژی همچنین می‌توانند به کوآنزیم‌های دیگری مانند یوریدین تری فسفات (UTP) و گوانوزین تری فسفات (GTP) که برای سنتز سلولز و ساکارز مورد نیاز هستند، منتقل شوند و موجب بهبود کیفیت میوه گردد (Ahmad *et al.*, 2017). فسفر باعث افزایش طعم، سفتی و محتوای ویتامین ث و همچنین بهبود رنگ پوست و پالپ میوه در گوجه فرنگی گردید (Su, 1974). فسفر به‌طور مستقیم در متابولیسم قند، پروتئین و چربی شرکت می‌کند و بر عملکرد و کیفیت درختان میوه تأثیر می‌گذارد (Chen *et al.*, 2021). علاوه بر فسفر کاربرد آمینوکلات سیلیسیم موجب بهبود فاکتورهای کیفی و کمی در توت‌فرنگی گردید. این یافته‌ها با نتایج حاصل از مطالعات Artyszak (2018) مطابقت داشت که گزارش کرد کاربرد ترکیبات سیلیسیم موجب افزایش عملکرد در انگور گردید، همچنین خصوصیات کیفی از جمله سفتی میوه را افزایش داد. یافته‌های قبلی در محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم در توت‌فرنگی نشان داد که تیمارهای سیلیکات پتاسیم افزایش معنی‌داری در مواد جامد محلول کل، قند کل، ویتامین ث، اسیدیته و محتوای آنتوسیانین در مقایسه با شاهد نشان دادند. به‌طور کلی، با افزایش میزان سیلیکات پتاسیم تا ۰/۶ گرم در لیتر، کیفیت شیمیایی میوه افزایش یافت (Nada, 2020).

Table 5. Variance analysis of quality characteristics of strawberry under different levels of phosphorus fertilizer and Si- aminochelate

S.O.V	df	Fruit dry matter	Fruit length	Fruit diameter	Firmness	EC	pH	TSS
Block	2	0.35 ^{ns}	0.02 ^{ns}	0.03 ^{ns}	0.12 ^{ns}	0.003 ^{ns}	0.021 ^{ns}	0.16 ^{ns}
Phosphorus (P)	3	2.30 *	1.15 **	2.39 **	15.46 **	0.026 **	0.033 *	10.72 **
Error a	6	0.34	0.07	0.04	0.24	0.001	0.004	0.19
Si-aminochlate (Si)	2	1.62 **	0.40 **	0.14 *	6.10 **	0.001 ^{ns}	0.008 ^{ns}	2.10 *
P×Si	6	0.82 **	0.10 ^{ns}	0.05 ^{ns}	0.73 ^{ns}	0.007 ^{ns}	0.06 **	0.21 ^{ns}
Error b	16	0.16	0.04	0.04	0.51	0.004	0.007	0.45
CV (%)	-	6.32	5.09	5.89	5.21	10.08	2.66	7.80

*,** and ns: Significant at 5% and 1% level probability and no significant, respectively.

Table 6. The main and interaction effects of phosphorus fertilizer and Si- aminochelate on quality characteristics of strawberry

Treatment	Fruit length (cm)	Fruit diameter (cm)	Firmness (N)	EC (dS m^{-1})	pH	TSS (%)
Phosphorus (Kg ha^{-1})						
0 (P_1)	3.77 ^{b}	3.00 ^{b}	11.98 ^{c}	0.64 ^{c}	3.08 ^{c}	7.66 ^{b}
7.5 (P_2)	4.06 ^{b}	3.20 ^{b}	13.98 ^{b}	0.75 ^{a}	3.18 ^{ab}	9.43 ^{a}
15 (P_3)	4.62 ^{a}	4.16 ^{a}	15.13 ^{a}	0.69 ^{b}	3.11 ^{bc}	9.66 ^{a}
30 (P_4)	4.04 ^{b}	3.23 ^{b}	14.02 ^{b}	0.63 ^{c}	3.21 ^{a}	7.66 ^{b}
Si- aminochelate (mL L^{-1})						
0 (Si_1)	3.96 ^{b}	3.28 ^{b}	12.95 ^{b}	0.67	3.17	8.13 ^{b}
2 (Si_2)	4.32 ^{a}	3.50 ^{a}	14.13 ^{a}	0.67	3.12	8.75 ^{a}
4 (Si_3)	4.09 ^{b}	3.40 ^{ab}	14.24 ^{a}	0.69	3.13	8.93 ^{a}
Phosphorus×Si-aminochelate						
P_1× Si_1	3.48	2.86	10.95	0.62	3.11 ^{bcd}	7.35
P_2× Si_1	3.69	3.23	13.58	0.74	3.04 ^{d}	8.75
P_3× Si_1	4.60	3.93	14.52	0.65	3.31 ^{a}	8.90
P_4× Si_1	4.08	3.12	12.78	0.69	3.25 ^{abc}	7.55
P_1× Si_2	4.09	3.19	12.15	0.65	3.10 ^{cd}	7.70
P_2× Si_2	4.27	3.24	14.04	0.78	3.13 ^{bcd}	9.70
P_3× Si_2	4.82	4.40	15.22	0.67	3.02 ^{d}	10.00
P_4× Si_2	4.12	3.19	15.12	0.59	3.26 ^{ab}	7.60
P_1× Si_3	3.74	2.97	12.85	0.66	3.03 ^{d}	7.95
P_2× Si_3	4.23	3.13	14.32	0.73	3.37 ^{a}	9.85
P_3× Si_3	4.45	4.15	15.65	0.77	3.00 ^{d}	10.10
P_4× Si_3	3.93	3.38	14.17	0.62	3.13 ^{bcd}	7.85

Mean with same letter are not significantly different according to Duncan test ($p \leq 0.05$).

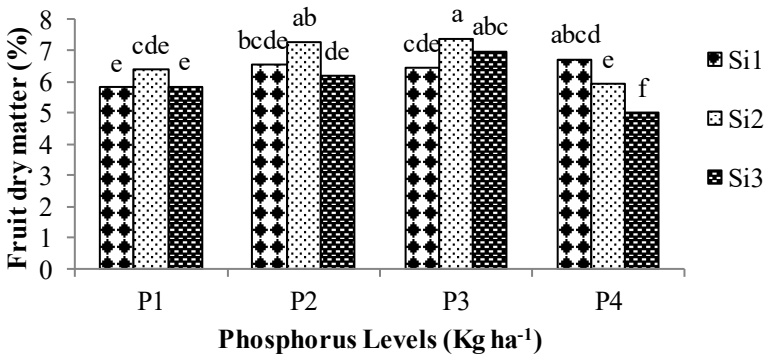


Figure 2. Interaction effect of different levels of phosphorus fertilizer and Si-aminochelate on fruit dry matter percentage of strawberry.

نتیجه‌گیری

یافته‌های این آزمایش نشان داد که با افزایش سطح فسفر تا ۱۵ کیلوگرم در هکتار و محلول پاشی آمینوکلات سیلیسیم تا غلظت ۲ میلی‌لیتر در لیتر، وزن تک میوه توت‌فرنگی به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافت و سهم مؤثرتری را نسبت به تعداد میوه در وزن کل میوه‌های یک بوته توت‌فرنگی ایفا کرد. به نظر می‌رسد افزایش غلظت رنگدانه‌های فتوسنتزی و دسترسی بیشتر فسفر تحت محلول‌پاشی آمینوکلات سیلیسیم در تیمارهای فسفری نقش کلیدی را در بهبود وزن کل میوه‌های یک بوته توت‌فرنگی ایفا کرده است. همچنین بر اساس نتایج این مطالعه، سهم اثرات اصلی فسفر و آمینوکلات سیلیسیم بر شاخص‌های کیفی توت‌فرنگی بیشتر از برهم‌کنش آن‌ها بوده است، اگرچه درصد pH عصاره و مادهٔ خشک میوه به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر برهمکنش این دو ترکیب قرار گرفت که می‌تواند نقش مؤثری در مزهٔ توت‌فرنگی داشته باشد. در این راستا عدم تفاوت معنی‌دار بین سطوح ۷/۵ و ۱۵ کیلوگرم در هکتار فسفر با محلول‌پاشی ۲ میلی‌لیتر در لیتر آمینوکلات سیلیسیم و سطح ۳۰ کیلوگرم در هکتار فسفر و عدم محلول‌پاشی می‌تواند از نتایج جالب توجه این پژوهش باشد که به نقش مؤثر محلول‌پاشی آمینوکلات سیلیسیم در بهبود کیفیت میوه در سطوح کم و متوسط فسفر اشاره دارد. با توجه با نتایج حاصل، استفاده از غلظت ۲ میلی‌لیتر در آمینوکلات سیلیسیم و سطح ۱۵ کیلوگرم در هکتار منوپتاسیم فسفات جهت حصول حداکثر رشد، عملکرد و کیفیت میوه‌های توت‌فرنگی توصیه می‌شود.

سپاس گزاری

این پژوهش بر اساس تأمین مالی از طریق پژوهانه انجام پذیرفت. بدین وسیله از حمایت و پشتیبانی معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز تشکر و قدردانی می‌گردد.

References

Abdollahi, F., Zarei, A., Erfani-Moghadam, J., & Rostaminia, M. (2024). Foliar application of silica and potassium sulphate on some characteristics of pomegranate fruit cv. 'Malase-Saveh'. *Plant Productions*, *47*(2), 309-321. [In Persian]

Ahmad, H., Sajjid, M., Hayat, S., Ullah, R., Ali, M., Jamal, A., & Ali, J. (2017). Growth, yield and fruit quality of strawberry (*Fragaria ananasa* Dutch) under different phosphorus levels. *Research in Agriculture*, *2*(2).

Al-aghabary, K., Zhu, Z., & Shi, Q. (2005). Influence of silicon supply on chlorophyll content, chlorophyll fluorescence, and antioxidative enzyme activities in tomato plants under salt stress. *Journal of Plant Nutrition*, *27*(12), 2101-2115.

Arnon, A. N. (1967). Method of extraction of chlorophyll in the plants. *Agronomy Journal*. *23*, 112-121.

Artyszak, A. (2018). Effect of silicon fertilization on crop yield quantity and quality-A literature review in Europe. *Plants*, *7*(3), 54.

Calvo, P., Nelson, L., & Kloepper, J. (2014). Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant and Soil*, *383*, 3-41.

Chapman, H. D., & Pratt, P. F. (1961). Methods of analysis for soils, plants and waters. priced publication 4034. Division of Agriculture Sciences. University of California, Berkeley, 5-350.

Chen, G., Li, Y., Jin, C., Wang, J., Wang, L., & Wu, J. (2021). Physiological and morphological responses of hydroponically grown pear rootstock under phosphorus treatment. *Frontiers in Plant Science*, *12*, 696045.

El-Bassiony, A. M., Fawzy, Z. F., Abd El-Samad, E. H., & Riad, G. S. (2010). Growth, yield and fruit quality of sweet pepper plants (*Capsicum annuum* L.) as affected by potassium fertilization. *Journal of American Science*, *6*(12), 722-729.

Estrada-Ortiz, E., Trejo-Téllez, L. I., Gómez-Merino, F. C., Núñez-Escobar, R., & Sandoval-Villa, M. (2013). The effects of phosphite on strawberry yield and fruit quality. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *13*(3), 612-620.

Ghoname, A. El-Bassiouny, A., Abdel-Mawgoud, A., El-Tohamy, W., & Gruda, N. (2012). Growth, yield and blossom-end rot incidence in bell pepper as affected by phosphorus level and amino acid applications. *Gesunde Pflanz*, *64*(1), 29-37.

Gray, R.C. (1977). Foliar fertilisation with primary nutrients during the reproductive stage of plant growth. *Proceedings of the Fertilizer Society*, *164*, 23.

Hu, A.Y., Xu, S.N., Qin, D.N., Li, W., & Zhao, X.Q. (2021). Role of silicon in mediating phosphorus imbalance in plants. *Plants*, *10*, 51.

Khan, H., Khan, M., Rasul, K., Majeed, A., & Safi, F. A. (2000). Effect of different levels of Nitrogen alone and in combination with constant doses of phosphorus and potassium on growth and yield of Okra (*Abelmoschus esculentus* L.) Cv. T-13 under Agro-climatic conditions of Mingora, Swat. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, *3*(12), 2101-2104.

Khavazi, K., Jahandideh mahjan abadi, V.A., & Taghipoor. (2018). Effect of sulfur, *Thiobacillus bacteria* and phosphorus on the yield and nutrient elements uptake of wheat in calcareous soil. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 8(2), 23-41. [In Persian]

Khosrofard, Z.S., Eshghi, S., Rastgoo, S., & Hedayat, M. (2017). Effect of root and foliar applications of silicon on growth of strawberry and mineral nutrient uptake under salinity stress in soilless culture. *Iranian Journal of Horticultural Science and Technology*, *18*(2), 195-208. [In Persian]

Kostic, L., Nikolic, N., Bosnic, D., Samardzic, J., & Nikolic, M. (2017). Silicon increases phosphorus (P) uptake by wheat under low P acid soil conditions. *Plant and Soil*, *419*, 447–455.

Li, Y., Sun, M., He, W., Wang, H., Pan, H., Yang, Q., & Zhuge, Y. (2021). Effect of phosphorus supplementation on growth, nutrient uptake, physiological responses, and cadmium absorption by tall fescue (*Festuca arundinacea* Schreb.) exposed to cadmium. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *213*, 112021.

Liang, Y., Nikolic, M., Bélanger, R., Gong, H., Song, A., Liang, Y., Nikolic, M., Belanger, R., Gong, H., & Song, A. (2015). Effect of silicon on crop growth, yield and quality. *Silicon in Agriculture: From Theory to Practice*, 209-223.

Liu, X., Ko, K., Kim, S., & Lee, K. (2008). Effect of amino acid fertilization on nitrate assimilation of leafy radish and soil chemical properties in high nitrate soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis, 39*, 269–281.

Luyckx, M., Hausman, J. F., Lutts, S., & Guerriero, G. (2017). Silicon and plants: current knowledge and technological perspectives. *Frontiers in Plant Science*, *8*, 411.

Ma, J.F., & Takahashi, E. (1990). Effect of silicon on the growth and phosphorus uptake of rice. *Plant and Soil*, *126*, 115–119.

Mali, M., & Aery, N. C. (2008). Silicon effects on nodule growth, dry-matter production, and mineral nutrition of cowpea (*Vigna unguiculata*). *Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 171*, 835-840.

Marschner, H. (1995). Mineral nutrition of higher plant. Academic press. London.

Mikkelsen, R. L. (2013). A closer look at phosphorus uptake by plants. *International Plant Nutrition Institute (IPNI) 13049*, Notrh America. 1-4.

Molaie, M, Tabatabaie, S.J., & Sharafi, Y. (2018). The effect of foliar application of glucose and mono potassium phosphate (KH_2PO_4) on some characteristics of strawberry cultivar "Camarosa" in Hydroponic condition. *Horticultural Plant Nutrition*, *1*(2), 51-64. [In Persian]

Mosali, J., Desta, K., Teal, R. K., Freeman, K. W., Martin, K. L., Lawles, J. W., & Raun, W. R. (2006). Effect of foliar application of phosphorus on winter wheat grain yield, phosphorus uptake, and use efficiency. *Journal of Plant Nutrition*, *29*, 2147-2163.

Nada, M. M. (2020). Effect of foliar application with potassium silicate and glycine betaine on growth and early yield quality of strawberry plants. *Journal of Plant Production*, *11*(12), 1295-1302.

Neu, S., Schaller, J., & Dudel, G.D. (2017). Silicon availability modifies nutrient use efficiency and content, C: N: P stoichiometry, and productivity of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *Scientific Report, 7*, 1–8.

Park, Y. G., Muneer, S., Kim, S., Hwang, S. J., & Jeong, B. R. (2018). Silicon application during vegetative propagation affects photosynthetic protein expression in strawberry. *Horticultural Science and Biotechnology*, *59*, 167-177.

Pinedo-Guerrero, Z. H., Cadenas-Pliego, G., Ortega-Ortiz, H., González-Morales, S., Benavides-Mendoza, A., Valdés-Reyna, J., & Juárez-Maldonado, A. (2020). Form of silica improves yield, fruit quality and antioxidant defense system of tomato plants under salt stress. *Agriculture*, *10*(9), 367.

Rahnama, A., James R.A., Poustini. K., & Munns R. (2010) Stomatal conductance as a screen for osmotic stress tolerance in durum wheat growing in saline soil. *Functional Plant Biology,* 37, 255-263.

Rahnama, A., Hosseinalipour, B., Farrokhian Firouzi, A., Harrison, M.T., & Ghorbanpour M. (2024). Root architecture traits and genotypic responses of wheat at seedling stage to water-deficit stress. *Cereal Research Communications,* 52, 1499-1510.

Ranjbar, P., Nazarideljo, M.J., & Hosseinzadeh, A. (2020). Effect of nano-silicon and imidacloprid foliar application on morpho-physiological characteristics of gerbera cut flower and its reaction to whitefly under greenhouse conditions. *Plant Productions*, *43*(2), 295-308. [In Persian]

Rao, I.M., Arulanantham, A., & Terry, N. (1989). Leaf phosphate status, photosynthesis and carbon partitioning in sugar beet. *Plant Physiology*, *90*, 820-826.

Romero-Aranda, M. R., Jurado, O., & Cuartero, J. (2006). Silicon alleviates the deleterious salt effect on tomato plant growth by improving plant water status. *Journal of Plant Physiology*, *163*(8), 847-855.

Roozitalab, M. H., Toomanian, N., Ghasemi Dehkordi, V. R., & Khormali, F. (2018). Major soils, properties, and classification. *The soils of Iran*, 93-147.

Schaller, J., Faucherre, S., Joss, H., Obst, M., Goeckede, M., Planer-Friedrich, B., Peiffer, S., Gilfedder, B., & Elberling, B. (2019). Silicon increases the phosphorus availability of Arctic soils. *Scientific Report, 9*, 1-11.

Seyed lor, L., Tabatabaie, S.J., & Fallahi, E. (2013). The effect of silicon on the growth and yield of strawberry grown under saline conditions. *Journal of Horticultural Science*, *23* (1), 88-95. [In Persian]

Shabani, E., Bolandnazar, S.A., Tabatabaei, S.J., Najafi, N., Alizadeh-Salteh, S., & Rouphael, Y. (2018). Stimulation in the movement and uptake of phosphorus in response to magnetic P solution and arbuscular mycorrhizal fungi in *Ocimum basilicum*, *Journal of Plant Nutrition*, *41*(13), 1662-1673.

Shabani, E. (2023). Improving the growth, P uptake and quality characteristics of 'Lollo Rosso' lettuce in the nutrient solution by *Bacillus subtilis* in different phosphorus concentrations. *Journal of Plant Nutrition*, *46*(6), 971-983.

Song, Z., Liu, H., Li, B., & Yang, X. (2013). The production of phytolith-occluded carbon in China's forests: implications to biogeochemical carbon sequestration. *Global Change Biology*, *19*, 2907-2915.

Souri, M., & Yarahmadi, B. (2016). Effect of amino chelates foliar application on growth and development of marigold (Calendula officinalis) plants. *Plant Production Technology*, *15*(2), 109-119.

Souri, M. K. (2016). Aminochelate fertilizers: the new approach to the old problem; a review. *Open Agriculture*, *1*(1), 118-123.

Su, N. R. (1974). Experiments involving the use of Sulfur coated fertilizer for corn and tomatoes. Agronomic Cooperators Workshop, Muscles Shoals, AL. 6-8.

Tabatabaei, S. J. (2013). *Principles of Mineral Nutrition Plant*. University of Tabriz press. Tabriz, Iran. [In Persian]

Tulipani, S., Mezzetti, B., & Battino, M. (2009). Impact of strawberries on human health: insight into marginally discussed bioactive compounds for the Mediterranean diet. *Public Health Nutrition*, *12*, 1656-1662.

Wuzhong, N. (2002). Yield and quality of fruits of solanaceous crops as affected by potassium fertilization. *Better Crops International*, *16*(1), 6-8.