Quality and Durability of Agricultural Products and Food Staffs

e ISSN: 2783-3410

Journal Homepage: https://sanad.iau.ir/journal/qafj/

Research Paper

Optimization of Water Consumption and Evaluation of Selected Performance Indicators of Greenhouse Strawberry in a Vertical Aeroponic Cultivation System

Amin Reza Jamshidi*

Department of Agricultural Mechanisation, Ke.C., Islamic Azad University, Kerman, Iran

Received: 07/05/2025, **Accepted:** 10/07/2025

Abstract

With the increasing demand for agricultural production with high water-use efficiency, soilless cultivation systems such as aeroponics have received growing attention. In this context, optimizing the operational parameters of these systems plays a key role in enhancing productivity and resource conservation. This study was conducted to optimize a vertical aeroponic cultivation system for determining the most efficient water-use performance and selected yield indicators of greenhouse strawberries. To evaluate the systems, the effect of nutrient misting on the roots of strawberry plants was assessed using a factorial experiment based on a randomized complete block design, involving 9 systems with 5 replications. The first factor was the nozzle diameter of the nutrient misting system at three levels: 25 µm, 50 µm, and 75 µm, while the second factor was misting duration at 10, 15, and 20 minutes. To optimize the system for improving water-use efficiency and strawberry performance, a general full factorial block design was used. The modeling in this study was structured to identify the optimal nozzle diameter and misting duration that would maximize yield and water-use efficiency. A comparison between first- and second-order models for estimating mean yield and water-use efficiency as functions of savings rate and misting time showed that second-order models provided a better fit to the experimental data (R^2 > 90%). Simultaneous optimization indicated that the ideal misting rate was 212 mL/min for a duration of 16 minutes. Under optimal conditions, the average yield per plant was 1.56 kg and water-use efficiency reached 98.17 kg/m³. These findings highlight the high effectiveness of precise technical parameter adjustments in improving the productivity of soilless cultivation systems. Evaluating the system's performance across different climates and seasons, along with smart modeling of water consumption and analysis of economic and energy aspects, could contribute to a more comprehensive assessment and support its commercialization.

Keywords: Nozzle diameter size, Foliar spraying, General full factorial

Citation: Jamshidi AR, Optimization of Water Consumption and Evaluation of Selected Performance Indicators of Greenhouse Strawberry in a Vertical Aeroponic Cultivation System. *Quality and Durability of Agricultural Products and Food Stuffs*, 2025; 4(4):12-28.

DOI: https://doi.org/10.71516/qafj.2025.1202162

© The Author(s) **Publisher:** Islamic Azad University of Kerman, Iran

***Corresponding author:** Amin Reza Jamshidi, **Email:** aminrezajamshidi@gmail.com

Extended Abstract

Introduction

Traditional soil-based agriculture often suffers from limitations such as salinity, poor soil texture, and water inefficiency. These constraints have driven the adoption of controlled-environment agriculture, where techniques like hydroponics and aeroponics are utilized to overcome environmental variability and improve crop performance. Among these, aeroponics has emerged as a highly efficient method, offering distinct advantages by delivering nutrient-rich mist directly to the plant roots suspended in air. This technique not only ensures enhanced oxygenation and faster root absorption but also leads to remarkable reductions in resource usage up to 99% in water and 50% in nutrients compared to conventional methods. Furthermore, aeroponics allows for vertical farming setups, making it suitable for urban agriculture and space-limited environments. Strawberries, known for their high nutritional value, flavor, and economic potential, are increasingly cultivated in greenhouses to meet growing demand. Their shallow root systems and sensitivity to precise water and nutrient delivery make them an ideal candidate for aeroponic research. However, to achieve maximum productivity and resource efficiency, technical parameters such as nozzle diameter and misting duration must be carefully optimized. The primary objectives of this study were to evaluate the influence of different nozzle diameters and misting durations on the growth and productivity of strawberries, develop statistical models (first-order and second-order) to identify optimal operational conditions, and determine the most effective settings that enhance yield and water-use efficiency in a vertical aeroponic system.

Methods

The experiment was conducted in a greenhouse at the Islamic Azad University of Kerman, Iran. Nine identical vertical aeroponic systems, each consisting of a five-level polyethylene column with 20 planting holes, were constructed. Nutrient solution was stored in an 80-liter tank at the base, and distributed via submerged pumps to three types of misting nozzles (diameter: 25 µm, 50 µm, 75 µm). A full factorial randomized complete block design was implemented, featuring two factors including Nozzle diameter (25, 50, 75 µm) and Misting duration (10, 15, 20 minutes). Each treatment was replicated five times, yielding 45 experimental units. Strawberry seedlings were germinated in rock wool and transplanted into the aeroponic systems. Hoagland's nutrient solution was used throughout the 65-day growth period. Parameters measured included plant height, root dry weight, total fruit yield, and water-use efficiency (calculated as kg fruit per m^3 water). Data were analyzed using Minitab 2018, with LSD tests at 5% and 1% significance levels. Both first- and second-order regression models were applied to evaluate factor effects.

Results and Discussion

The highest average plant height (265.62 cm) was observed in the treatment with a 50 µm nozzle and 20-minute misting duration. The lowest (152.4 cm) was recorded with a 75 µm nozzle and 10-minute misting. The second-order regression model showed excellent fit (R^2 = 99.43%), indicating strong predictability of plant height based on these parameters. Root dry weight varied significantly with nozzle size and misting duration. The highest dry weight (56.5 g) was observed with a 75 µm nozzle and 10-minute misting, while the lowest (38.8 g) occurred with a 50 µm nozzle and 20-minute misting. Interestingly, heavier misting or larger droplets appeared to reduce oxygen availability, negatively impacting root

development. Yield performance was highest (61 kg per system) with a 50 µm nozzle and 20-minute misting, and lowest (41.5 kg) with a 75 µm nozzle and 10-minute misting. Yield was most responsive to nozzle size, supporting the notion that optimal droplet size is crucial in delivering nutrients efficiently without causing runoff or oversaturation. The most efficient water usage (128 kg/m³) was achieved with a 50 µm nozzle and 20-minute misting. The results demonstrated that misting time had a positive effect on WUE, but nozzle size played a more dominant role. Second-order models for WUE had high predictive accuracy (R^2 = 96.28%). Second-order polynomial regression models proved superior to first-order models in estimating plant performance and WUE. Multi-response optimization using the Desirability Function Approach (DFA) revealed that the best operational setting was a 50 µm nozzle combined with a 16-minute misting interval at a nutrient mist rate of 212 mL/min. Under these optimized conditions, the average yield per plant was 1.56 kg, and water-use efficiency reached 98.17 kg/m³.

Conclusion

This study confirms that fine-tuning key technical parameters in vertical aeroponic systems significantly boosts the productivity and resource efficiency of greenhouse strawberry cultivation. Specifically, a nozzle diameter of 50 µm and a misting duration of 16 minutes were identified as optimal. These settings enhanced both biomass accumulation and water-use metrics without compromising root health or nutrient uptake. The research highlights the value of aeroponics as a sustainable cultivation method in water-scarce environments and controlled greenhouses. Future research should focus on seasonal and climatic variability assessments, economic viability and energy consumption modeling, and optimization of nutrient solution compositions for other high-value crops. Through such efforts, the potential for commercialization and large-scale deployment of aeroponic technology can be significantly enhanced.

Keywords: Nozzle diameter size, Foliar spraying, General full factorial.

Funding: There was no external funding in this study.

Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest.

کیفیت و ماندگاری تولیدات کشاورزی و مواد غذایی

شاپا الکترونیکی: ۳۴۱۰-۲۷۸۳

Journal Homepage: https://sanad.iau.ir/journal/qafj/

واحد کرمان

مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی مصرف آب و بررسی برخی شاخص‌های عملکرد توت‌فرنگی گلخانه‌ای در سامانه کاشت ایروپونیک عمودی

امین رضا جمشیدی*

گروه مهندسی مکانیزاسیون کشاورزی، واحد کرمان، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمان، ایران

دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۷، **پذیرش:** ۱۴۰۴/۰۴/۱۹

چکیده

با افزایش تقاضا برای تولید محصولات کشاورزی با بهره‌وری بالای آب، سیستم‌های کشت بدون خاک مانند ایروپونیک موردتوجه قرار گرفته‌اند. در این میان، بهینه‌سازی پارامترهای عملکردی این سامانه‌ها نقش کلیدی در افزایش تولید و صرفه‌جویی منابع دارد. این تحقیق به‌منظور بهینه‌سازی سامانه کاشت ایروپونیک عمودی برای تعیین بهینه‌ترین کارایی مصرف آب و برخی شاخص‌های عملکرد توت‌فرنگی گلخانه‌ای انجام شد. جهت ارزیابی سامانه‌ها، تأثیر محلول‌پاشی غذایی بر روی ریشه گیاه توت‌فرنگی گلخانه‌ای با آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی توسط ۹ سامانه و در ۵ تکرار انجام شد. عامل اول اندازه قطر نازل‌های محلول‌پاشی غذایی در سه سطح ۲۵ میکرون، ۵۰ میکرون و ۷۵ میکرون بود و عامل دوم زمان محلول‌پاشی، در سه سطح ۱۰ دقیقه، ۱۵ دقیقه و ۲۰ دقیقه مورد بررسی قرار گرفتند. به‌منظور بهینه‌سازی سامانه برای افزایش کارایی مصرف آب و عملکرد توت‌فرنگی گلخانه‌ای از روش طرح فاکتوریل کامل جنرال و بر پایه بلوک استفاده شد. در این مطالعه مدل‌سازی به‌گونه‌ای صورت گرفت که حداکثر عملکرد و کارایی مصرف آب سامانه را در استفاده از مناسب‌ترین اندازه قطر نازل و زمان محلول‌پاشی نشان می‌دهد. مقایسه مدل‌های مرتبه اول و دوم برای نشان دادن میانگین عملکرد و کارایی مصرف آب به‌عنوان توابعی از نرخ صرفه‌جویی و زمان صرفه‌جویی نشان داد که مدل‌های مرتبه دوم با دقت بالاتری (R2>٪۹۰) نسبت به مدل مرتبه اول به داده‌های تجربی برازش داده می‌شوند. بهینه‌سازی همزمان نشان داد که مناسب‌ترین نرخ پاشش ۲۱۲ میلی‌لیتر بر دقیقه و برای مدت‌زمان پاشش ۱۶ دقیقه بود. در شرایط بهینه، میانگین عملکرد هر بوته ۱/۵۶ کیلوگرم و کارایی مصرف آب ۹۸/۱۷کیلوگرم بر مترمکعب بود. این یافته‌ها بیانگر اثربخشی بالای تنظیم دقیق پارامترهای فنی سامانه در بهبود بهره‌وری کشت بدون خاک می‌باشد. تحلیل عملکرد سامانه در اقلیم‌ها و فصول مختلف، همراه با مدل‌سازی هوشمند مصرف آب و مطالعه اقتصادی و انرژی بر سامانه، می‌تواند به ارزیابی جامع‌تر و تجاری‌سازی آن کمک کند.

واژه‌های کلیدی: قطر نازل، محلول‌پاشی، فاکتوریل کامل جنرال

استناد: امین رضا جمشیدی، بهینه‌سازی مصرف آب و بررسی برخی شاخص‌های عملکرد توت‌فرنگی گلخانه‌ای در سامانه کاشت ایروپونیک عمودی، کیفیت و ماندگاری تولیدات کشاورزی و موادغذایی، (۱۴۰۴)، دوره۴، شماره۴، صفحات ۱۲-۲۸.

DOI: https://doi.org/10.71516/qafj.2025.1202162

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان، ایران

* **نویسنده مسئول:** امین رضا جمشیدی، **پست الکترونیک:** aminrezajamshidi@gmail.com

مقدمه

برخی چالش‌ها نظیر شوری و نامناسب بودن بافت خاک در کشت‌های سنتی، زمینه‌ساز گسترش روش‌های کشت بدون خاک شده‌اند(۱). امروزه انواعی از روش‌های کنترل‌شده کشت بدون خاک در جهان برای پرورش گیاهان به کار گرفته می‌شوند که ازجمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به کشت هیدروپونیک و اروپونیک اشاره کرد(۱). تلفیق کشت‌های گلخانه‌ای با فناوری‌های جدید نظیر اروپونیک (هواکشت) امکان کنترل هر چه بهتر آب و تغذیه گیاهان را فراهم آورده است(۲). کشاورزی در شرایط کنترل شده همانند استفاده از سامانه‌های اروپونیک و هیدروپونیک که در آن‌ها آب مصرفی حاوی عناصر غذایی گیاهان پرورشی است. از هدف‌های اصلی متخصصان سبزی‌کاری جهت بالا بردن مقدار محصول در واحد سطح می‌باشد(۳). در این میان، یکی از روش‌های آینده‌دار در میان سیستم‌های هیدروپونیک، سامانه پیشرفته اروپونیک است که تاکنون برای پرورش انواع سبزیجات مانند کاهو، گوجه‌فرنگی، خیار، توت‌فرنگی، و نیز گیاهان زینتی و دارویی مورد استفاده قرار گرفته است(۴). در روش اروپونیک، محلول غذایی مستقیماً به ریشه گیاه رسانده شده و در نتیجه نرخ رشد اکثر گیاهان دو تا سه برابر بیشتر و سریع‌تر از سایر سیستم‌های آبکشت است(۵). استفاده از این روش می‌تواند ۹۹ درصد صرفه‌جویی در مصرف آب و ۵۰ درصد صرفه‌جویی در مصرف مواد مغذی را همراه داشته باشد(۶). همچنین گزارش‌های متعددی در زمینه افزایش عملکرد محصولات مختلف با استفاده از روش اروپونیک گزارش شده است. در بررسی کشت سه رقم سیب‌زمینی در شرایط اروپونیک و هیدروپونیک، عملکرد، تعداد ریز غده در بوته و ارتفاع بوته در سیستم کشت اروپونیک نسبت به هیدروپونیک بیشتر بود (۷). همچنین چاندرا و همکاران طی آزمایشی افزایش عملکرد گیاهان خیار، گوجه‌فرنگی، اسفناج، کلم قرمز و فلفل در سیستم اروپونیک نسبت به تولید آن در خاک را به اثبات رساندند(۸). یکی از فاکتورهای مؤثر در بهره‌وری از روش اروپونیک، اندازه قطرات آب است. زیرا توسعه ریشه‌های گیاهان در محیط‌های اروپونیک با اندازه قطرات آب و استفاده از اسپری بهره می‌گیرند(۸). دانشمندان در استفاده از سیستم کشت اروپونیک به این نتیجه دست یافتند که اندازه قطرات محلول موادغذایی به‌طور مستقیم بر روی رشد گیاه تأثیر دارد. همچنین مجزا بودن فواصل غبار پاشی و مدت دوام پاشش در سیستم اروپونیک اجازه سنجش میزان جذب عناصر غذایی را در شرایط مختلف می‌دهد(۹). قطرات بسیار درشت و بسیار ریز آب مورد استفاده در سامانه‌های اروپونیک باعث می‌شوند که اکسیژن کمتری در دسترس ریشه قرار گیرد(۱۰). به همین دلیل نازل‌های اتمیزه جهت محلول‌پاشی موادغذایی در محیط کشت اروپونیک از ۱۰ تا ۱۰۰ میکرون طبقه‌بندی شده‌اند(۱۱). لاخیر و همکاران(۲۰۱۸)، در تحقیقات خود بر روی بسیاری از گونه‌های گیاهی اندازه قطرات بیش از ۱۰۰ میکرون را به دلیل سقوط محلول غذایی از روی ریشه گیاه مناسب ندانستند. محققین دیگری نیز میزان آب و اثر آن بر رشد و خصوصیات فیزیولوژیکی خیار را مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند که ارتفاع گیاه و رشد خیار به زمان و میزان محلول‌پاشی غذایی بستگی دارد. باراک ۱۹۹۶ از یک سیستم اروپونیک برای اندازه‌گیری سرعت جذب آب و عناصر غذایی در پرورش کرانبری استفاده کرد. این محقق در پژوهش‌هایش نشان داد پاشش محلول غذایی به میزان ۶۵ پوند بر هر اینچ مربع باعث افزایش قابلیت دستیابی گیاهان به عناصر غذایی می‌شود. اما پاشش مداوم و شدید عناصر غذایی باعث سوختگی ریشه و شاخه و برگ‌های گیاه می‌شود. بنابراین مشخص گردید رشد گیاهان و دوره میوه‌دهی زمانی که دوره پاشش مناسب نباشد، به شدت کاهش می‌یابد. لذا ریشه‌های گیاهان اروپونیک نباید هیچگاه کاملاً خشک و نه کاملاً و مداوم خیس باشند. استونر و همکاران(۱۹۹۷)، در تحقیقات خود به این نتیجه دست یافتند که در استفاده از سامانه اروپونیک برای محلول‌پاشی بر روی ریشه فلفل، مناسب‌ترین میزان آبدهی ۷ دقیقه پاشش و ۱۵ دقیقه وقفه بیشترین عملکرد را در پی خواهد داشت. توت‌فرنگی گلخانه‌ای از میوه‌های خوش‌طعم و خوش‌عطر فصل بهار می‌باشد. این میوه سرشار از ویتامین‌های C، B و املاح معدنی است. این میوه‌ی پرطرفدار به دو روش گلخانه‌ای و کشت در مزرعه پرورش می‌یابد. ارقام وحشی توت‌فرنگی با نام علمی *Fragaria vesca* در برخی از مناطق نواحی شمال ایران، دامنه‌های البرز و آذربایجان به‌طور طبیعی رشد می‌یابد. توت‌فرنگی میوه‌ای است که تولید آن با

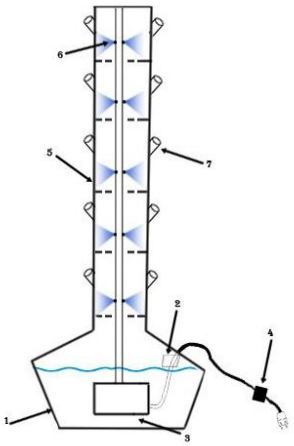
سودآوری بالایی برای پرورش‌دهندگان همراه خواهد بود و بررسی آماری کشت و کار این میوه نشان می‌دهد علاقه به تولید آن در حال افزایش است و درامد گلخانه زیر کشت توت‌فرنگی، قابل‌توجه است. توت‌فرنگی از تیره گلسرخیان، از جنس *فرگاریا* (*Fragaria*) می‌باشد .توت‌فرنگی گلخانه‌ای یک ساقه بسیار کوتاه دارد که طوقه نامیده می‌شود. طول این ساقه کوتاه حداکثر ۲/۵ سانتیمتر است که توسط برگ‌های متوالی احاطه شده است. در محور هر برگ یک جوانه وجود دارد که می‌تواند به یک طوقه جانبی یا یک روندک تبدیل شود یا اینکه در حالت خواب باقی بماند. طوقه توت‌فرنگی محتوی یک بافت مغذی است که دستجات آوندی به‌صورت مارپیچ از اطراف این بافت عبور می‌کند تا وارد دمبرگ و برگ‌ها گردد. ریشه‌ها به‌صورت اولیه دائمی با نقش ساختاری و تعدادی ریشه‌های ثانویه افشان برای جذب آب و موادغذایی می‌باشد. امکان ایجاد ریشه‌های نابجا از طوقه هم وجود دارد. این گیاه دارای برگ‌های مرکب است که دارای ۳ برگچه بیضی‌شکل با دمبرگ نسبتاً طویل و کرک‌دار می‌باشد که به رنگ سبز تیره و در بعضی از ارقام شفاف می‌باشد. ساختمان گل شامل ۵ گلبرگ سفید است و کاسه گل شامل ۵ کاسبرگ سبزرنگ که در قسمت تحتانی تقریباً به یکدیگر متصل شده‌اند. تعداد کاسبرگ‌ها در بعضی از ارقام به بیش از ۵ عدد می‌رسد. تعداد پرچم‌ها تقریباً ۲۰ عدد می‌باشد. مادگی به تعداد زیاد و به‌صورت مارپیچ بر روی نهنج قرار گرفته و همراه با نهنج فرم نسبتاً کشیده‌ای را تشکیل داده است. مادگی از فندقه‌های جدا از هم تشکیل شده است. در هر تخمدان یک تخمک وجود دارد و تعداد بذر به تعداد فندقه‌ها تولید می‌شود. پس از تلقیح گل و ریزش گلبرگ‌ها، نهنج به‌تدریج رشد می‌کند و گوشتی می‌شود. میوه توت‌فرنگی یک سته کاذب و مجتمع است که میوه واقعی توت‌فرنگی همان فندقه‌های کوچک قهوه‌ای‌رنگ روی بافت نهنج است. گرده‌افشانی کامل و مناسب از پیش‌نیازهای تولید میوه‌های خوش‌فرم است زیرا هرکدام از فندقه‌ها با تولید هورمون اکسین سبب رشد بافت نهنج زیر خود می‌گردد. هورمون‌های دیگر مانند جیبرلین و سایتوکینین هم در رشد و نمو میوه‌ها دخیل هستند اما اهمیت کمتری دارند. دمای نامناسب سبب گرده‌افشانی ناکافی و بدشکلی میوه‌ها می‌شود. سرمازدگی بهاره سبب از بین رفتن دانه‌های گرده یا مادگی‌ها می‌شود که باعث کاهش میزان گرده‌افشانی و بدشکلی میوه‌ها می‌شود. کمبود عناصری مانند کلسیم، منیزیم و روی‌هم در ایجاد بدشکلی میوه‌ها دخیل است. مطالعات زیادی در زمینه بهبود سیستم ایروپونیک انجام شده است، اما اثرات انواع نازل‌های محلول‌پاش و تغییر مدت‌زمان محلول‌پاشی غذایی بر عملکرد توت‌فرنگی نیاز به بررسی بیشتری دارد. روش بهینه‌سازی چند پاسخی مجموعه‌ای از تکنیک‌های ریاضی و آماری است که جهت توسعه، پیشبرد و بهینه کردن فرآیند به کار می‌رود که در آن‌ها سطح موردنظر تحت تأثیر متغیرهای بسیاری قرار داشته و هدف بهینه کردن پاسخ مذبور است. روش سطح پاسخ کاربرد قابل‌توجهی در طرح‌ریزی، توسعه، فرموله کردن محصولات جدید غذایی و همچنین ارتقای سامانه‌ها دارد. این روش‌شناسی، تجزیه‌ای علاوه بر آنالیز تأثیرات متغیرهای مستقل، یک مدل ریاضی را نیز که توضیح‌دهنده فرآیند است، در اختیار محقق قرار می‌دهد. هدف از تحقیق حاضر، بررسی تأثیر استفاده از نازل‌های محلول‌پاش در زمان‌های مختلف محلول‌پاشی غذایی در طی دوره رشد توت‌فرنگی گلخانه‌ای و بهینه‌سازی برخی شاخص‌های عملکرد این محصول و کارایی مصرف آب در یک سامانه اروپونیک عمودی با استفاده از طرح فاکتوریل کامل جنرال بر پایه بلوک بود.

روش کار

ارزیابی سامانه

آزمایش‌های موردنیاز این پروژه در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان در پائیز سال ۱۴۰۰، انجام شد. بدین منظور ۹ سامانه اروپونیک عمودی ۵ طبقه‌ای یکسان ساخته و مورد استفاده قرار گرفتند. هر سامانه از یک ستون پلی‌اتیلنی به قطر ۲۰ سانتی‌متر و از ۲۰ حفره تشکیل می‌شد که در پایین آن یک مخزن ۸۰ لیتری تعبیه شده بود تا درون آن آب و موادغذایی ریخته شود. درون این مخزن یک پمپ شناور ۳۵۰w قرار داده شده بود تا محلول غذایی را به سامانه عمودی منتقل نماید. در میانه سامانه‌ها، جهت محلول‌پاشی از نازل‌هایی با اندازه متفاوت ۲۵، ۵۰ و ۷۵

میکرون استفاده شد. طرحواره این سامانه در شکل (۱)، نشان داده شده است.



شکل ۱- طرحواره سامانه اروپونیک عمودی شامل: ۱- مخزن ۲- درب مخزن ۳- پمپ ۴- تایمر ۵- ستون سامانه و طبقات ۶- نازل‌های ۳۶۰ درجه ۷- محل قرارگیری گلدان‌های نگهدارنده گیاه توت‌فرنگی

جهت انجام آزمایش‌ها، ابتدا بذر توت‌فرنگی درون سلول‌هایی حاوی پشم سنگ قرار داده شدند و به مدت ۸ روز آبیاری شدند. سپس بذرهای رشد کرده با بستر پشم‌سنگ به حفره‌های روی ستون سامانه اروپونیک منتقل شدند. محلول غذایی درون مخزن، محلول تجاری هوگلند می‌باشد که ترکیبات آن در جدول شماره (۱)، نشان داده شده است. این محلول به نسبت ۱ میلی‌لیتر در یک لیتر آب مخلوط و درون هر مخزن ریخته می‌شد تا از طریق لوله‌ای به میان ستون سامانه و نازل‌ها انتقال یابد. محلول غذایی پس از هر هفته یک بار مقدار ۵۰ میلی‌گرم از پودر غذایی (بر اساس توصیه شرکت تولیدکننده) به آب مخزن هر سامانه اضافه شد. از هر تکرار در هر تیمار ۳ بوته به‌طور تصادفی انتخاب و در زمان برداشت میوه (۶۵ روز بعد از انتقال به سامانه)، برخی شاخص‌های رشد شامل ارتفاع بوته، وزن خشک ریشه و عملکرد میوه هر سامانه اندازه‌گیری شدند. تغییرات pH و EC محلول غذایی هر هفته یک بار اندازه‌گیری و میانگین آن‌ها در پایان دوره رشد مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی شامل ۹ تیمار با ۵ تکرار انجام شد. لازم به ذکر است که هر ردیف بوته روی ستون سامانه (شامل چهار بوته) به‌عنوان یک بلوک در نظر گرفته شد. در پایان هر هفته میزان آب کاهش‌یافته از هر مخزن توسط ارتفاع‌سنج اندازه‌گیری، ثبت و تا پایان مرحله برداشت کارایی مصرف آب طبق فرمول شماره (۱)، محاسبه شد. در این آزمون‌ها عامل اول اندازه قطر نازل‌های محلول‌پاشی غذایی در سه سطح ۲۵ میکرون، ۵۰ میکرون، و ۷۵ میکرون بود و عامل دوم زمان محلول‌پاشی، در سه سطح ۱۰ دقیقه، ۱۵ دقیقه و ۲۰ دقیقه مورد بررسی قرار گرفتند. هر تکرار به‌عنوان یک بلوک در نظر گرفته شد و درمجموع تعداد کل آزمایش‌ها برابر با ۴۵ آزمایش شد. داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Minitab نسخه ۲۰۱۸ تجزیه‌وتحلیل و رسم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار اکسل نسخه۲۰۱۶، انجام پذیرفت. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون LSD و در سطح احتمال ۰/۰۵ و ۰/۰۱ انجام شد.

جدول ۱- غلظت عناصر غذایی در محلول غذایی مورد استفاده در سامانه آروپونیک (۶).

عناصر غذایی Nutrients	mg/l	عناصر غذایی Nutrients	mg/l
N	۲۴۲	Cl	۱/۸
K	۳۲۲	B	۰/۳
Ca	۲۲۴	Mn	۰/۱
P	۳۱	Zn	۰/۱
Mg	۴۹	Cu	۰/۰۳
Fe	۳	Mo	۰/۰۳

$$WUE = \frac{Y}{W} \quad (۱)$$

در این رابطه، Y عملکرد اقتصادی و W مقدار کل آب مصرفی تا زمان برداشت محصول می‌باشد.

طراحی آزمایش و بهینه‌سازی

طرح فاکتوریل کامل: هنگامی‌که یک آزمایش تجزیه‌وتحلیل می‌شود، در واقع یک مدل از داده‌ها عبور داده می‌شود. مدل به‌دست‌آمده از طرح فاکتوریل مدل خطی درجه یک می‌باشد. مدل خطی در طرح فاکتوریل به شرح زیر می‌باشد:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i\ x_i + \sum\sum_{j<i} \beta_{ij}\ x_i\ x_j + \varepsilon$$

β_0 ، β_i ، β_{ij} به ترتیب ضرایب رگرسیونی برای مقدار ثابت، اثرات خطی و اثرات متقابل، y متغیر وابسته و یا پاسخ، x_i ، x_j متغیرهای مستقل و ε مقدار خطا می‌باشد. برآورد ضرایب رگرسیون باعث می‌شود که مدل به بهترین نحو از مجموعه‌ی داده‌های جمع‌آوری‌شده، به روش حداقل مربعات عبور داده شود.

طرح فاکتوریل عمومی: طرح فاکتوریل عمومی طرحی است که تمام سطوح هر عامل در یک آزمایش با تمام سطوح عامل دیگر ترکیب شده است. در این پژوهش، اندازه قطر نازل و زمان آبیاری هر کدام در سه سطح مورد بررسی قرار گرفتند که درمجموع تعداد آزمایش‌های حاصل از ترکیب سطوح این دو عامل برابر با ۹ آزمایش شد که هر آزمایش ۵ تکرار داشت که هر تکرار به خاطر تفاوت در محل قرارگیری در سامانه‌ها به‌عنوان بلوک در نظر گرفته شده‌اند و درمجموع تعداد کل آزمایش‌های ما برابر با ۴۵ آزمایش شد. سطوح مختلف فاکتورهای مورد بررسی در جدول ۲ ارائه شده‌اند. تمام آزمایش‌ها با ترتیب تصادفی به‌منظور کاهش خطای آزمایش انجام شدند.

مدل درجه دو: زمانی که داده‌ها در یک مدل خطی به‌خوبی برازش نمی‌شوند می‌توان از یک مدل درجه دو برای بیان رفتار یک تابع استفاده کرد. شکل کلی یک مدل درجه دو، که علاوه بر اثرات اصلی فاکتورها و اثرات متقابل آن‌ها شامل اثرات درجه دو هر یک از فاکتورها می‌باشد به شکل زیر است:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{p} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{p}\sum_{j=1}^{p} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^{p} \beta_{ii} x_i^2$$

β_0 : میانگین کلی پاسخ

β_i : اثر اصلی iام فاکتور

β_{ij} : اثر متقابل بین iام و jام فاکتور

β_{ii} : اثر درجه دو برای فاکتور iام

جدول ۲- فاکتورها و سطوح آن‌ها در طرح فاکتوریل کامل کلی

فاکتور	علامت	واحد	تعداد سطوح	سطح یک	سطح دو	سطح سه
قطر نازل	x	میکرون	۳	۲۵	۵۰	۷۵
زمان	t	دقیقه	۳	۱۰	۱۵	۲۰

بهینه‌سازی

در این تحقیق از روش بهینه‌سازی چند پاسخی استفاده شد. از بهینه‌سازی چند پاسخی با استفاده از DFA برای بهینه‌سازی همزمان چندین پارامتر استفاده می‌شود. در این روش برای به حداکثر رساندن یک متغیر وابسته، تابع مطلوب به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$d_i(Y_i) = \begin{cases} 0 & Y_i(X) < L_i \\ \left(\frac{Y_i(X) - L_i}{T_i - L_i}\right)^{S_i} & L_i \le Y_i(X) \le T_i \\ 1 & Y_i(X) > T_i \end{cases}$$

و برای به حداقل رساندن متغیر وابسته، به شرح زیر است:

$$d_i(Y_i(X)) = \begin{cases} 1 & Y_i(X) < T_i \\ \left(\frac{Y_i(X) - U_i}{T_i - U_i}\right)^{S_i} & T_i \le Y_i(X) \le U_i \\ 0 & Y_i(X) > U_i \end{cases}$$

جایی که di (Yi(X)) تابع مطلوب Yi(X) و Li، Ui و Ti و Yi(X) به ترتیب مرز پایین، مرز بالا، مقدار هدف برای پاسخ و مقدار هر یک از متغیر وابسته هستند. Si یک پارامتر است که شکل di (Yi(X)) را تعیین می‌کند: اگر Si = 1، شکل تابع خطی؛ اگر Si>1، محدب و اگر Si<1>0، مقعر است. DFA، یک پاسخ تخمین زده شده (به‌عنوان‌مثال، ام پاسخ ارزیابی شده Yi) را به یک مقدار بدون مقیاس به نام مطلوبیت تبدیل می‌کند (di برای Yi تعریف می‌شود). این یک مقدار بین ۰ و ۱ است و هنگامی‌که مقدار پاسخ مربوطه مطلوب‌تر می‌شود، افزایش می‌یابد. مطلوبیت D، مقدار دیگری بین ۰ و ۱که با ترکیب ارزش‌های مطلوبیت فردی مشخص می‌شود. سپس، مقدار بهینه با حداکثر کردن D تعیین می‌شود. مطلوبیت کلی D ارزش دیگری بین ۰ و ۱ است که با ترکیب مقادیر مطلوبیت منحصربه‌فرد تعریف می‌شود و مقدار بهینه به‌وسیله ماکزیمم کردن D به دست می‌آید.

$$D = \left(d_1^{v_i} \times d_2^{v_i} \times d_3^{v_i} \times \ldots \times d_n^{v_i}\right)^{1/\Sigma v_i} = \left(\prod_{i=1}^{n} d_i^{v_i}\right)^{1/\Sigma v_i}$$

نتایج و بحث

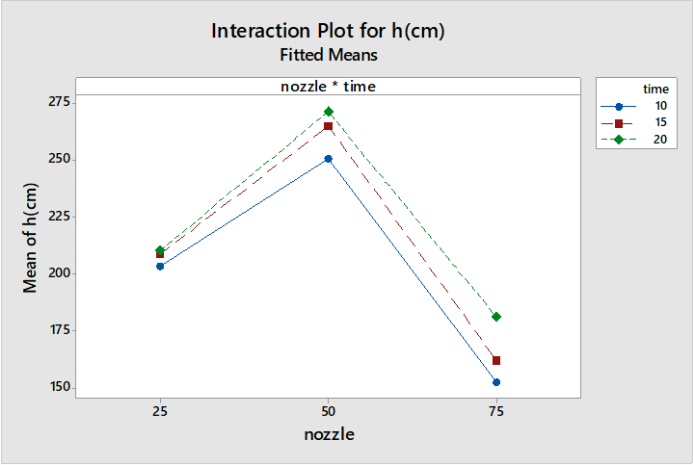
نتایج تجربه واریانس حاصل از اندازه‌گیری صفات مورد مطالعه در جدول (۳)، نشان داده شده‌اند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که اثر متقابل بین اندازه قطر نازل و زمان محلول‌پاشی در صفات میانگین ارتفاع بوته و اثر اصلی اندازه قطر نازل و زمان محلول دهی در میانگین وزن خشک ریشه‌ها اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۱٪ دارد. همچنین تجزیه‌ی واریانس عملکرد میوه و کارایی مصرف آب نشان داد که اثر اصلی اندازه قطر نازل و اثر اصلی مدت‌زمان محلول‌پاشی در سطح احتمال ۱ ٪ معنی‌دار است.

جدول ۳- تجزیه واریانس برخی صفات کمی بوته‌های توت‌فرنگی و کارایی مصرف آب در اندازه نازل و زمان محلول‌پاشی

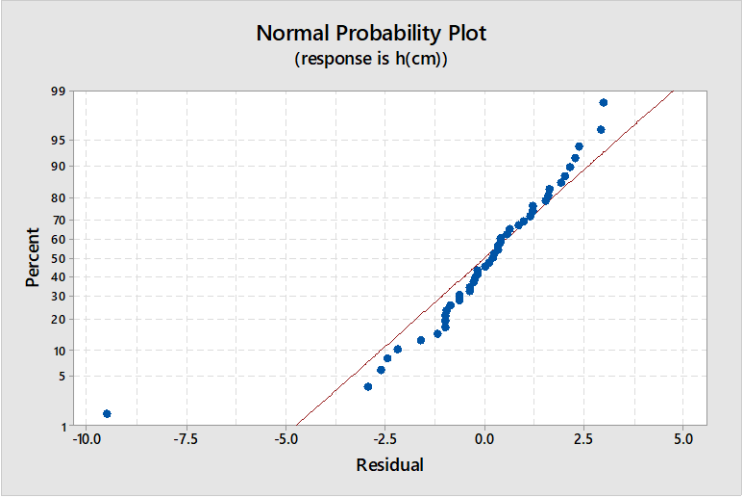
منابع تغییرات / درجه آزادی		میانگین مربعات			
		ارتفاع بوته	وزن خشک ریشه	عملکرد سامانه	کارایی مصرف آب
اندازه قطر نازل	۲	۳۵۶۵۸/۷**	۱۴۷۰/۹۵**	۱۱۱۰/۴۲**	۶۴۷۶/۲**
زمان محلول‌پاشی	۲	۱۳۱۷**	۴۷/۷۷**	۴۰/۰۲**	۱۷۱/۷۲**
اندازه × زمان	۴	۱۸۲/۵**	۵۲/۷۵	۰/۱۲	۰/۷۸
بلوک	۴	۲۱/۵**	۰/۶۵	۲۲/۵**	۹۸/۰۷**
اشتباه آزمایشی	-	۵/۷	۱/۴۹	۲/۱۴۹	۳/۷۰

**، * و ns به ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال ۱٪ و ۵٪ و بدون اختلاف معنی‌دار

مطابق شکل (۲)، مقایسه میانگین‌های اثر متقابل اندازه قطر نازل با مدت‌زمان محلول‌پاشی نشان می‌دهد که بیشترین ارتفاع بوته (۲۶۵/۶۲ سانتی‌متر) مربوط به زمان ۲۰ دقیقه محلول‌پاشی غذایی با نازل ۵۰ میکرون و کمترین ارتفاع بوته (۱۵۲/۴ سانتی‌متر) مربوط زمان ۱۰ دقیقه محلول‌پاشی غذایی با اندازه نازل ۷۵ میکرون می‌باشد. بنابراین مشخص گردید، استفاده از نازل‌های ۵۰ میکرون در سامانه‌ها در مدت‌زمان ۲۰ دقیقه پاشش بیشترین تأثیر را بر روی رشد ارتفاع بوته گیاه داشته است که ممکن است به دلیل دسترسی بیشتر گیاه به آب در مدت‌زمان موردنظر با اندازه نازل ۵۰ میکرون باشد. این نتایج با نتایج لاخیر و همکاران (۲۰۱۸)، که مناسب‌ترین اندازه نازل را در سیستم اروپونیک زیر ۱۰۰ میکرون معرفی کردند مطابقت دارد. شکل (۳)، نشان می‌دهد که در نمودار توزیع نرمال باقی‌مانده‌های داده‌های جمع‌آوری‌شده از یک توزیع نرمال پیروی می‌کنند. بنابراین هر چه تفاوت بین داده‌های تجربی و مقدار پیش‌بینی‌شده توسط نرم‌افزار کمتر باشد داده‌ها به خط گذرنده از وسط نمودار نزدیک‌تر هستند. شکل (۳)، بیانگر یک توزیع تقریباً نرمال برای ارتفاع بوته می‌باشد.



شکل ۲- میانگین اثر متقابل اندازه قطر نازل و مدت‌زمان محلول‌پاشی موادغذایی بر ارتفاع بوته توت‌فرنگی



شکل ۳- توزیع نرمال برای ارتفاع بوته‌های توت‌فرنگی

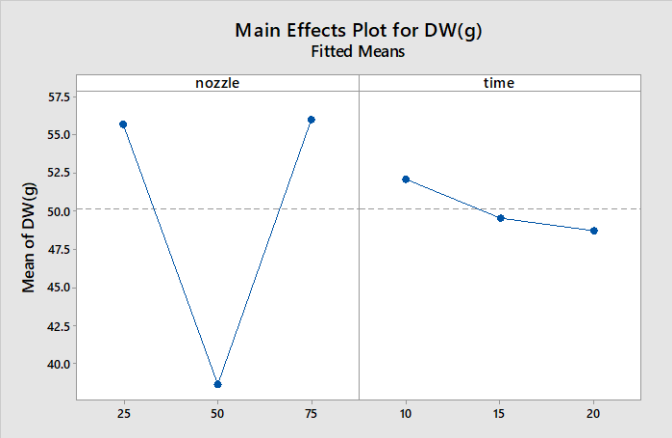
بعد از آنالیز داده‌ها، دو مدل خطی و غیرخطی درجه دو از داده‌های آزمایشی گذرانده شد. با توجه به مقدار R^2 و تفاوت بسیار کم آن با مقدار R_{adj}^2، مدل درجه دو به‌عنوان بهترین مدل برای بیان رفتار ارتفاع بوته بر اساس قطر

نازل و زمان آبیاری انتخاب شد و پس از حذف عوامل غیر مهم با تأثیر اندک بر روی این پارامتر در زیر آورده شده است:

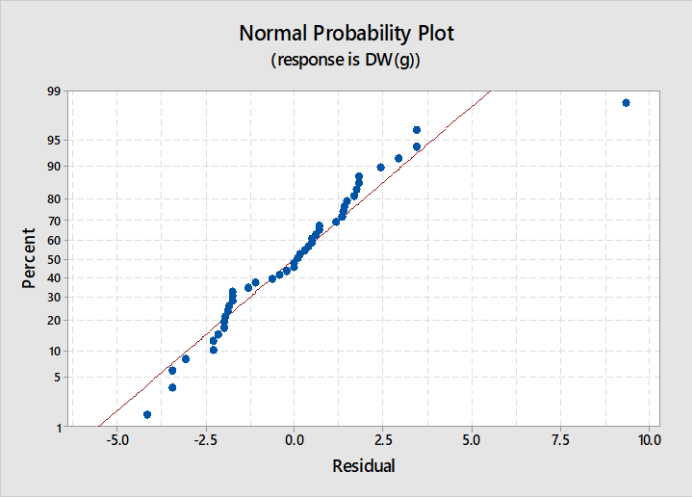
$$Bh\ (cm) = 0.2 + 10.695\ Nozzle + 0.27\ Time - 0.12180\ Nozzle \times Nozzle - + 0.04272\ Nozzle \times Time$$

R^2= 99.43% R_{adj}^2= 99.36%

ضریب رگرسیون (R^2>۰/۹۹) برای ارتفاع بوته و همچنین تفاوت مقدار کم آن با ضریب رگرسیون تعدیل‌شده (R_{adj}^2>۰/۹۹) نشان‌دهنده‌ی این است که داده‌ها به‌خوبی در مدل درجه دو برازش می‌شوند. شکل (۴)، میانگین وزن خشک ریشه بر اساس اندازه قطر نازل و مدت‌زمان محلول دهی غذایی را نشان داده است. در نتایج به‌دست‌آمده مشخص گردید بیشترین وزن خشک ریشه گیاه توت‌فرنگی (۵۶/۵ گرم)، مربوط به سامانه با استفاده از نازل ۷۵ میکرون و زمان محلول‌پاشی ۱۰ دقیقه و کمترین وزن خشک ریشه (۳۸/۸ گرم) مربوط به سامانه با از نازل ۵۰ میکرون و زمان محلول‌پاشی ۲۰ دقیقه بود. نمودار اثر اصلی فاکتورهای مورد بررسی بر وزن خشک ریشه نشان می‌دهد که با افزایش قطر نازل ابتدا مقدار وزن ریشه کاهش و سپس دوباره افزایش پیدا می‌کند و تأثیر زمان یک تأثیر منفی بر وزن ریشه می‌باشد. در این شرایط با توجه به اندازه ذرات محلول غذایی پاشیده شده بر روی ریشه و فاصله زمانی بیشتر و دسترسی کمتر ریشه‌های اصلی به اکسیژن اطراف ریشچه بر روی ریشه اصلی بیشتر و درنهایت وزن خشک ریشه افزایش پیدا کرده بود. بر اساس این نمودار، تغییرات قطر نازل تأثیر بیشتر از زمان بر وزن خشک ریشه دارد. بنابراین چنین استنباط می‌شود که در زمان محلول دهی کمتر ریشه جهت رسیدن به آب و محلول رشد طولی آن افزایش و در زمان اشباع از آب کمترین رشد را خواهد داشت که منجر به وزن کمتر می‌شود. از طرفی محلول‌پاشی بر روی ریشه با نازل ۷۵ میکرون به دلیل وزن سنگین قطرات محلول غذایی و عمودی بودن سازه محلول غذایی از روی ریشه سر خورده و به پایین منتقل و از دسترس ریشه خارج می‌شود. نتایج فوق با نتایج قوینشنگ و همکاران (۲۰۱۸)، مطابقت دارد. در همین زمینه ناسا (۲۰۰۶)، نیز بهترین جذب آب و موادغذایی توسط گیاهان را در استفاده از نازل‌های ۸۰ میکرون معرفی کرده است. شکل (۵)، نشان می‌دهد که در نمودار توزیع نرمال باقیمانده داده‌های جمع‌آوری‌شده از یک توزیع نرمال پیروی می‌کنند. بنابراین هر چه تفاوت بین داده‌های تجربی و مقدار پیش‌بینی‌شده توسط نرم‌افزار کمتر باشد داده‌ها به خط گذرنده از وسط نمودار نزدیک‌ترند. شکل (۵)، بیانگر یک توزیع تقریباً نرمال برای وزن خشک ریشه می‌باشد.



شکل ۴- میانگین اثر اصلی اندازه قطر نازل و مدت‌زمان محلول‌پاشی موادغذایی بر وزن خشک ریشه



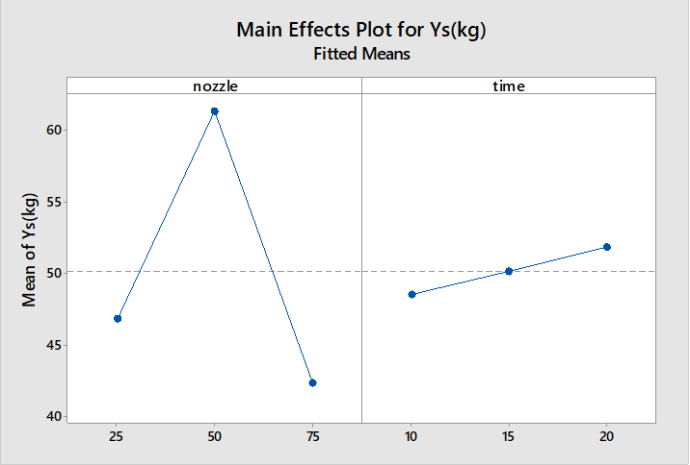
شکل ۵- توزیع نرمال باقی‌مانده برای وزن خشک ریشه

مدل درجه دو: مدل درجه دو وزن خشک ریشه پس از حذف عوامل غیر مهم به‌صورت زیر است، اثر متقابل عوامل در مدل درجه دو برخلاف مدل درجه یک مهم نیست:

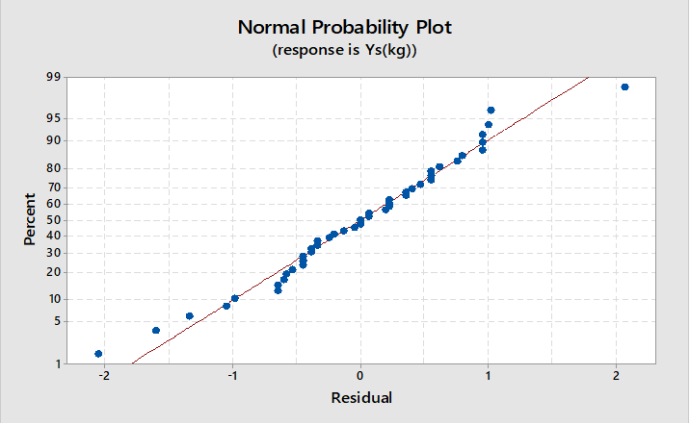
$$DW\ (g) = 125.35 - 2.844\ Nozzle - 1.820\ Time + 0.02744\ Nozzle \times Nozzle + 0.0376\ Time \times Time$$

$R^2 = 92.66\%$ $R_{adj}^2 = 91.72\%$

مقادیر ضریب رگرسیون نشان می‌دهد که داده‌ها مربوط به وزن خشک ریشه همانند ارتفاع بوته به‌خوبی در مدل درجه دو برازش می‌شوند. شکل (۶)، عملکرد بوته در سامانه تحت تأثیر اندازه قطر نازل و زمان‌های مختلف محلول‌پاشی را نشان می‌دهد. این نمودار نشان می‌دهد که در بررسی مقایسه میانگین‌ها، اثر اصلی اندازه قطر نازل و مدت‌زمان محلول‌پاشی موادغذایی در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار می‌باشد، به‌نحوی‌که بیشترین عملکرد سامانه با وزن ۶۱ کیلوگرم مربوط به زمان ۲۰ دقیقه محلول‌پاشی موادغذایی توسط نازل با قطر ۵۰ میکرون است. همچنین کمترین عملکرد سامانه با وزن ۴۱/۵ کیلوگرم مربوط به زمان ۱۰ دقیقه محلول‌پاشی موادغذایی با استفاده از نازل ۷۵ میکرون است. نمودار اثر اصلی فاکتورها بر عملکرد سامانه مانند سایر پارامترهای مورد بررسی نشان‌دهنده‌ی اثر بیشتر تغییر قطر نازل نسبت به زمان است. بنابراین چنین استنباط می‌شود که استفاده از نازل ۱۰ میکرون با توجه به تولید ذرات بسیار ریز محلول غذایی، حالت اشباعی را در میان سامانه به وجود می‌آورد که باعث عدم اکسیژن‌رسانی کامل به ریشه خواهد شد که درنهایت باعث کاهش عملکرد می‌شود. از طرفی استفاده از نازل با اندازه قطر ۷۵ میکرون ذرات بسیار سنگینی را به وجود می‌آورد که با توجه به سازه عمودی سامانه در اثر سر خوردن از روی ریشه‌ها به پایین منتقل می‌شود و ریشه فرصت استفاده و جذب محلول غذایی را نخواهد داشت. این نتایج با نتایج لاخیر(۲۰۱۸)، مطابقت دارد. شکل (۷)، نمودار توزیع نرمال عملکرد سامانه را نشان می‌دهد که همانند ارتفاع و وزن خشک ریشه گیاه رفتاری تقریباً نرمال از خود نشان می‌دهد.



شکل ۶- نمودار میانگین اثرات اصلی اندازه قطر نازل و زمان محلول‌دهی غذایی بر عملکرد سامانه



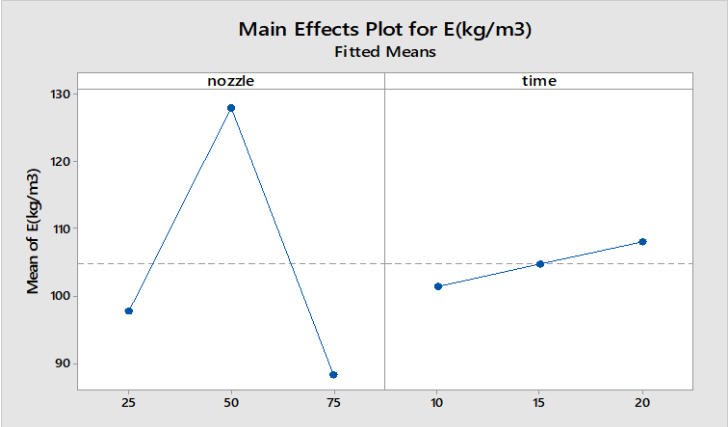
شکل ۷- توزیع نرمال پراکندگی داده‌ها در عملکرد سامانه

مدل درجه دو:

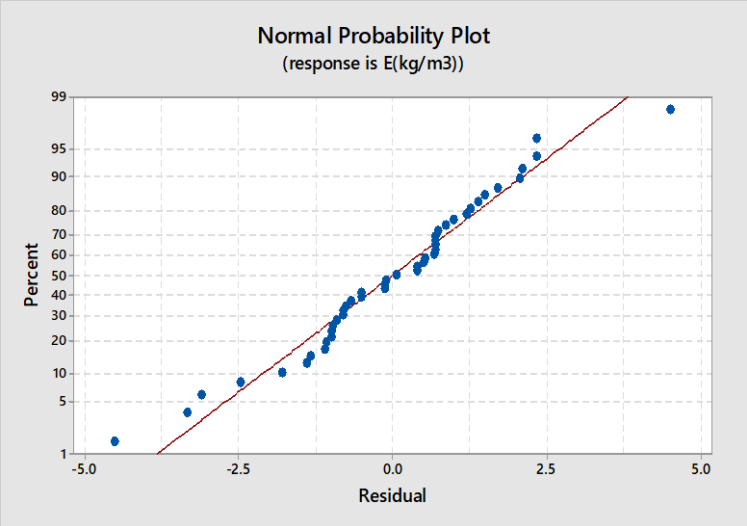
$$Ys(kg) = -6.42 + 2.6053\ Nozzle + 0.327\ Time - 0.026827\ Nozzle \times Nozzle$$

$R^2 = 96.43\%$ $R_{adj}^2 = 95.97\%$

شکل (۸)، نمودار میانگین اثر اصلی اندازه قطر نازل و مدت‌زمان محلول‌پاشی را بر کارایی مصرف آب نشان می‌دهد. نمودار نشان می‌دهد که با افزایش قطر نازل، کارایی مصرف آب ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. همچنین، افزایش مدت‌زمان محلول‌پاشی موجب روند صعودی در کارایی مصرف آب می‌شود. بر این اساس، مشخص گردید که تأثیر قطر نازل بر کارایی مصرف آب چشم‌گیرتر از مدت‌زمان محلول‌پاشی است. بیشترین میزان کارایی مصرف آب، برابر با ۱۲۸ کیلوگرم بر مترمکعب، در شرایط استفاده از نازل ۵۰ میکرون و زمان محلول‌پاشی ۲۰ دقیقه به دست آمد. شکل (۹)، نمودار توزیع باقی‌مانده مربوط به کارایی مصرف آب، مشابه سایر پارامترهای اندازه‌گیری‌شده در این پژوهش، توزیعی تقریباً نرمال را نشان می‌دهد.



شکل ۸- میانگین اثرات اصلی اندازه قطر نازل و زمان محلول‌دهی غذایی بر کارایی مصرف آب



شکل ۹- توزیع نرمال باقی‌مانده برای کارایی مصرف آب

مدل درجه دو:

$E\ (kg/m^3) = -12.8 + 5.428\ Nozzle + 0.65\ Time - 0.05608\ Nozzle \times Nozzle$

$R^2 = 96.28\%$ $R_{adj}^2 = 95.80\%$

بهینه‌سازی

بهینه‌سازی نهایی بر اساس روش بهینه‌سازی چند پاسخی به‌منظور کاهش میانگین ارتفاع بوته، کاهش وزن خشک ریشه، افزایش عملکرد هر سامانه و افزایش کارایی مصرف آب به‌طور همزمان انجام شد. میانگین داده‌ها در جدول (۴)، نشان داده شده است. درنهایت پس از استفاده از نرم‌افزار بهینه‌ترین حالت را در استفاده از سامانه با نازل ۵۰ میکرون و مدت‌زمان محلول‌پاشی ۱۰ دقیقه معرفی نمود(جدول ۵).

جدول ۴- میانگین عملکرد ارتفاع بوته، وزن خشک ریشه، عملکرد و کارایی مصرف آب هر سامانه در زمان‌های مختلف

قطر نازل (µ)	زمان (s)	ارتفاع بوته (cm)	وزن خشک ریشه (kg)	عملکرد هر سامانه (kg)	کارایی مصرف آب (kg/m3)
۲۵	۱۰	۲۰۳	۵۶	۴۵/۲	۹۴/۴
۵۰	۱۰	۲۵۰/۵	۴۴/۴	۵۹	۹۸/۶
۷۵	۱۰	۱۵۲/۴	۵۷	۴۱/۵	۸۸/۲
۲۵	۱۵	۲۰۸/۶	۵۵	۴۶/۸	۹۷/۶
۵۰	۱۵	۲۴۴/۹۴	۳۹	۵۷	۱۲۵/۳
۷۵	۱۵	۲۴۰/۴	۴۱	۵۸	۱۲۰/۲
۲۵	۲۰	۲۱۰/۰۴	۵۵/۲	۴۸/۶	۱۰۱/۴
۵۰	۲۰	۲۵۵/۶۲	۳۸/۸	۶۱	۱۲۸/۲
۷۵	۲۰	۱۶۰/۷	۴۴/۵	۴۳	۱۰۰/۲

جدول ۵- بهینه‌سازی چند پاسخی

متغیر	بهترین پاسخ
نازل	۵۰
زمان	۱۰

در این مطالعه مدل‌سازی به‌گونه‌ای صورت می‌گیرد که حداکثر عملکرد و کارایی مصرف آب سامانه را در استفاده از مناسب‌ترین اندازه قطر نازل و زمان محلول‌پاشی نشان می‌دهد. مقایسه مدل‌های مرتبه اول و دوم برای نشان دادن میانگین عملکرد و کارایی مصرف آب به‌عنوان توابعی از نرخ صرفه‌جویی و زمان صرفه‌جویی نشان داد که مدل‌های مرتبه دوم با دقت بالاتری (R2>٪۹۰) نسبت به مدل مرتبه اول به داده‌های تجربی برازش داده می‌شوند. بهینه‌سازی همزمان نشان داد که مناسب‌ترین نرخ پاشش ۲۱۲ میلی‌لیتر بر دقیقه و برای مدت‌زمان پاشش ۱۶ دقیقه بود. در شرایط بهینه، میانگین عملکرد هر بوته ۱۱.۵۶/۵۶ کیلوگرم و کارایی مصرف آب ۹۸/۱۷ کیلوگرم بر مترمکعب بود.

نتیجه‌گیری

این تحقیق نشان داد که استفاده از نازل با قطر ۵۰ میکرون و مدت‌زمان محلول‌پاشی ۱۶ دقیقه در سیستم ایروپونیک عمودی، بهترین عملکرد را برای کشت توت‌فرنگی گلخانه‌ای دارد. تحت این شرایط، میانگین عملکرد هر بوته به ۱/۵۶ کیلوگرم و کارایی مصرف آب به ۹۸/۱۷ کیلوگرم بر مترمکعب رسید. این نتایج تأکید می‌کند که تنظیم دقیق پارامترهای فنی مانند قطر نازل و زمان محلول‌پاشی می‌تواند بهره‌وری سیستم‌های کشت بدون خاک را به‌طور چشمگیری افزایش دهد. بررسی عملکرد سیستم در اقلیم‌ها و فصول مختلف برای تعیین پایداری آن، مدل‌سازی هوشمند مصرف آب و بهینه‌سازی انرژی در سیستم‌های ایروپونیک، تحلیل اقتصادی و مقایسه هزینه‌های سیستم ایروپونیک با سایر روش‌های کشت برای تجاری‌سازی و مطالعه تأثیر ترکیبات مختلف محلول‌های غذایی بر رشد و عملکرد محصولات دیگر در سیستم ایروپونیک در تحقیقات آینده می‌تواند موردتوجه پژوهشگران قرار گیرد.

تعارض منافع

نویسنده اعلام می‌دارد که هیچ‌گونه تعارض منافع وجود ندارد.

References

1. Singh MC, Kachwaya DS, Kapil K. Soilless Cucumber Cultivation under Protective Structures in Relation to Irrigation Coupled Fertigation Management, Economic Viability and Potential Benefits-A Review. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences. 2018;7(3):2451-68.
2. Singh MC, Yousuf A, Singh JP. Greenhouse microclimate modeling under cropped conditions-A review. Research in Environment and Life Sciences. 2016; 9:1552-7.
3. Singh MC, Singh KG, Singh JP. Nutrient and Water Use Efficiency of Cucumbers Grown in Soilless Media under a Naturally Ventilated Greenhouse. Journal of Agricultural Science and Technology. 2019; 21:193-207.
4. Kratsch HA, Graves WR, Gladon RJ. Aeroponic system for control of root-zone atmosphere. Environmental and Experimental Botany. 2006; 55:70-6.
5. Ahmadi K, Ebadzadeh H, Hatami F, Hosseinpour R, Abdolshah H. Agricultural Statistics for the Year 2017. Ministry of Agricultural Jihad, Deputy for Planning and Economic Affairs, Information and Communication Technology Center; 2018. 241 p.
6. Tavasoli A, Ghanbari A, Ahmadian A. The effect of manganese and zinc nutrition on fruit yield and nutrient concentration in tomatoes in hydroponic cultivation. Science and Technology of Greenhouse Crops. 2010;1(1):6-1.
7. Barak P, Smith JD, Krueger AR, Peterson LA. Measurement of short-term nutrient uptake rates in cranberry by aeroponics. Plant, Cell & Environment. 1996;19(2):237-42.
8. Christie CB, Nichols MA. Aeroponics - a production system and research tool. South Pacific Soilless Culture Conference, Acta Horticulturae. 2004; 648:185-90.
9. Grobkinsky DK, Svensgaard J, Christensen S, Roitsch T. Plant phenomics and the need for physiological phenotyping across scales to narrow the genotype-to-phenotype knowledge gap. Journal of Experimental Botany. 2015;66(18):5429-40.
10. Hayden AL. Aeroponic and hydroponic systems for medicinal herb rhizome, and root crops. Journal of Horticultural Science. 2006; 41:16-8.
11. Hayden AL, Giacomelli GA, Yokelson T, Hoffmann JJ. Aeroponics: An alternative production system for high-value root crops. Acta Horticulturaeic. 2004;207-13.
12. Clawson J, Hoehn A, Stodieck L, Todd P, Stoner R. Re-Examining Aeroponics for Spaceflight Plant Growth. SAE Technical Paper 0148-7191; SAE International: Warrendale, PA, USA; 2000.
13. Lakhiar IA, Gao J, Syed TN, Chandio FA, Buttar NA. Modern plant cultivation technologies in agriculture under controlled environment: A review on aeroponics. Journal of Plant Interactions. 2018;13(1):338-58.
14. Lakhiar IA, Liu X, Wang G, Gao J. Experimental study of ultrasonic atomizer effects on values of EC and ph of nutrient solution. International Journal of Agricultural and Biological Engineering. 2018;11(5):59-64.
15. Qiansheng LI, Xiaoqiang LI, Tang B, Mengmeng GU. Growth Responses and Root Characteristics of Lettuce Grown in Aeroponics, Hydroponics, and Substrate Culture. Horticultural Journal. 2018;4(35):9.
16. Salcedo GA, Reca J. Irrigation water consumption modelling of a soilless cucumber crop under specific greenhouse conditions in a humid tropical climate. Ciencia Rural. 2017; 47:1-9.
17. Stoner RJ, Clawson JM. A high performance, gravity insensitive, enclosed aeroponic system for food production in space. Principal Investigator, NASA SBIR NAS10-98030; 1997.
18. Taia A. Abd El-Mageed, Wael M. Semida, Ragab S. Taha, Mostafa M. Rady. Effect of summer-fall deficit irrigation on morpho-physiological, anatomical responses, fruit yield and water use efficiency of cucumber under salt affected soil. Scientia Horticulture. 2018; 237:148-55.

19. Zhang H, Chi D, Wang Q, Fang J, Fang X. Yield and quality response of cucumber to irrigation and nitrogen fertilization under subsurface drip irrigation in solar greenhouse. Agricultural Sciences in China. 2011; 10:921-30.